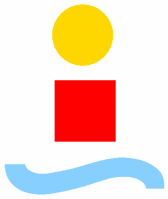


4º Ingeniero Aeronáutico

AVIÓNICA Y SISTEMAS DE NAVEGACIÓN

Pfr. Fco. Rogelio Palomo Pinto

Curso 2006/2007

CAPÍTULO V. AYUDAS A LA NAVEGACIÓN

- *Tema 1: Introducción a la Navegación Aérea*
- *Tema 2: Navegación a la Estima: Doppler, Inercial, Navegadores Integrados*
- *Tema 3: Radionavegación Largo Alcance: LORAN C, NavSat*
- *Tema 4: **Radionavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS/LAAS***
- *Tema 5: Gestión de Ruta*

Bibliografía:

- Avionics Navigation Systems, 2nd Ed., M.Kayton, W.R.Fried, Wiley
- Sistemas de Navegación, del compás magnético a la navegación por satélite, A.Corbasi, McGraw Hill
- Sistemas de Navegación Aérea, R.Arán Escuer, J.R.Aragoneses, Paraninfo
- Principles of Avionics, A.Helfrick, Avionics Communications, Inc

CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***ADF/NDB:***
  - –Principio de Funcionamiento
  - –Radiogoniómetro Automático
  - –Emisora/Receptor
  - –Detector de Tormentas
- ***VOR:***
  - –Uso y Fase del Vuelo
  - –Descripción General
  - –Señal del VOR
  - –Emisora VOR Convencional
  - –Emisora VOR Doppler
  - –Diagrama Bloques Receptor
- ***DME:***
  - –Descripción General
  - –Características de la Señal
  - –Diagrama Bloques Interrogador
  - –Equipo DME de Tierra
- ***VOR/DME:***
  - –VOR/DME
  - –TACAN-VORTAC
- ***ILS:***
  - –Senda de Aproximación
  - –Uso y Fase del Vuelo
  - –Principio de Funcionamiento
  - –Geometría de Guiado
  - –Emisora ILS
  - –Receptor ILS

CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

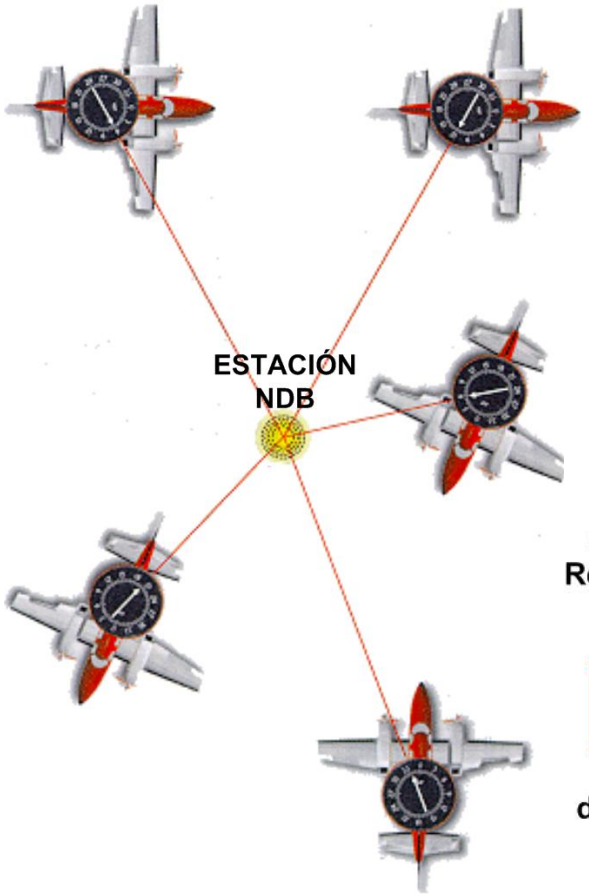
- ***MLS:***
  - –Principio de Funcionamiento
- ***LAAS/GBAS:***
  - –Principio de Funcionamiento

CAPÍTULO V.

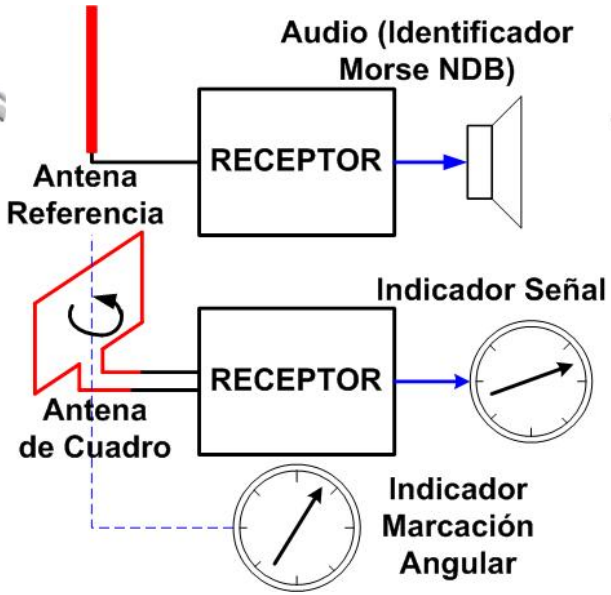
Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

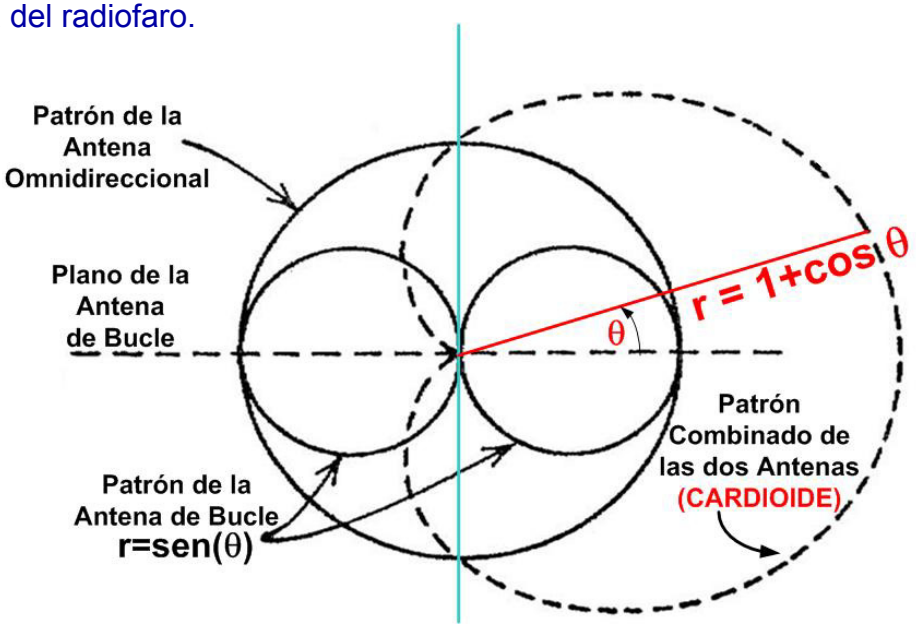
- ***ADF/NDB:***
  - Principio de Funcionamiento

El radiogoniómetro es un equipo embarcado capaz de detectar la dirección de la que proceden las señales de radio originadas en estaciones especiales para la navegación aérea (radiofaros no direccionales, NDB) o en emisoras de radiodifusión normales. Debido la última posibilidad se considera a este equipo semi autónomo, ya que puede basarse en equipos terrestres no especializados.
En el caso de que el radiogoniómetro sea automático, al conjunto se le llama ADF/NDB ("Automatic Direction Finder/Non Directional Beacon"). Si no es automático se le llama DF/NDB.



El principio básico de todo radiogoniómetro está en componer un diagrama de radiación direccional mediante combinación de los patrones de radiación de dos o más antenas, por ejemplo un diagrama cardioide. Un diagrama de radiación cardioide caracteriza por tener un eje orientado hacia delante, con un nulo en la parte de detrás. Un diagrama cardioide se compone sumando el diagrama de radiación de una antena omnidireccional (un monopolo) con el diagrama de radiación de un dipolo de bucle (o antena de cuadro), desfasado en 90º.
El eje de la cardioide rota cuando rota el eje del patrón de la antena de bucle. Si esta rotación se realiza rotando mecánicamente la antena de cuadro se trata de un DF/NDB.
El DF/NDB localizará la dirección de emisión del radiofaro omnidireccional NDB cuando el eje de la cardioide se prolongue hasta la antena del radiofaro.





CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***ADF/NDB:***
  - Radiogoniómetro Automático

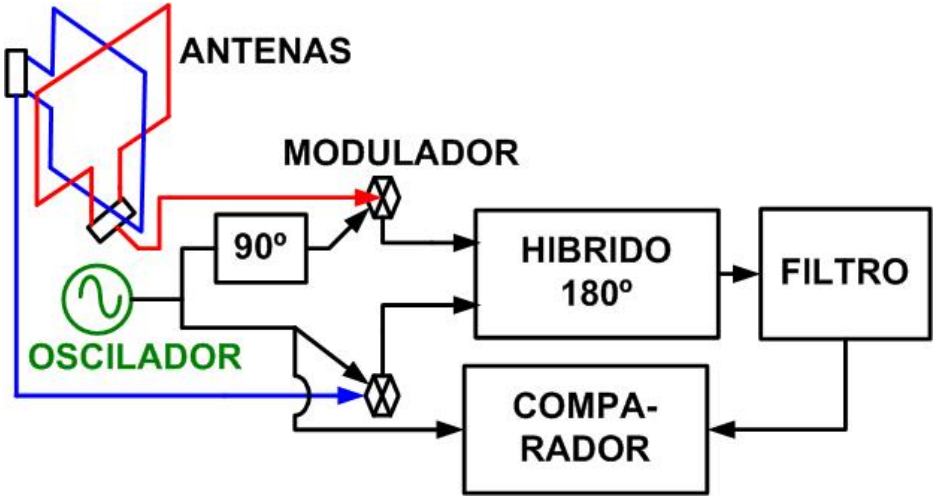
El radiogoniómetro automático (ADF/NDB) evita la rotación mecánica de la cardiode, sustituyéndola por un tratamiento de señales. Las antenas del ADF son dos antenas de cuadro perpendiculares entre sí. Cada antena de cuadro tiene un patrón de recepción con forma de ocho (van como r=sen(θ) ó r=cos(θ) respectivamente), siendo θ el ángulo de la recta que une el centro de las antenas de cuadro con la antena emisora NDB). Las salidas de las antenas, al detectar una señal con ángulo de incidencia θ serán: $V_1 = \cos\theta\cos\omega_c t\ ,\ V_2 = \mathrm{sen}\,\theta\cos\omega_c t$

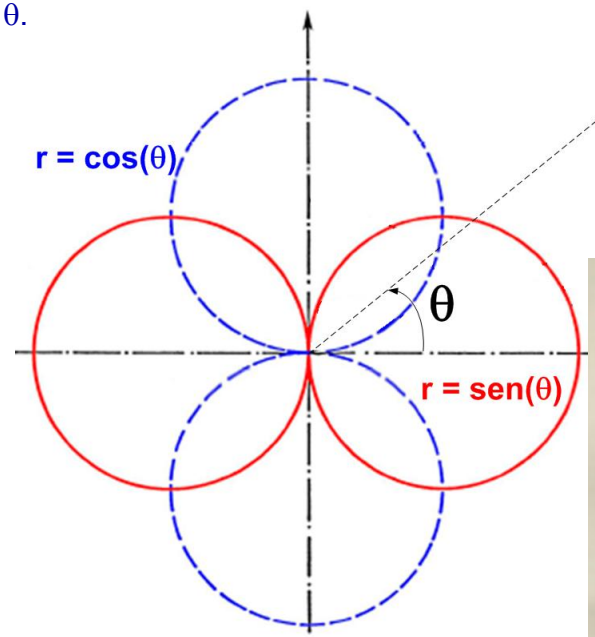
con ω_c la pulsación de la portadora.Estas dos señales son moduladas en sendos moduladores con dos señales coherentes desfasadas 90º con frecuencia Ω /2π , provenientes de un oscilador; Las salidas de los moduladores serán:

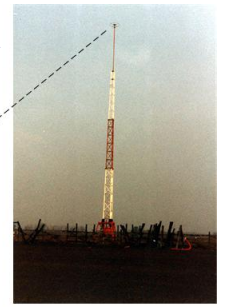
$V_1 = \cos(\theta)\cos(\Omega t)\cos(\omega_c t)\ \ ,\ V_2 = \mathrm{sen}(\theta)\mathrm{sen}(\Omega t)\cos(\omega_c t)$ que restadas en un híbrido de 180º se transforman en:

$$V_{FASE} = \cos(\theta)\cos(\Omega t)\cos(\omega_c t) - \mathrm{sen}(\theta)\mathrm{sen}(\Omega\, t)\cos(\omega_c t) = \cos(\Omega t + \theta)\cos(\omega_c \mathrm{t})$$

La señal de V_{FASE} pasa un filtro para eliminar la portadora y a continuación se compara con la señal de referencia del oscilador, cos(Ωt) para poder resolver el ángulo de incidencia θ.







CAPÍTULO V.

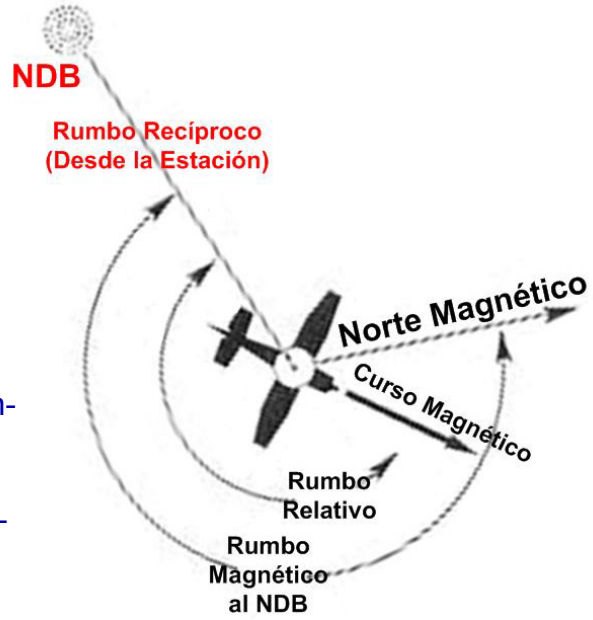
Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***ADF/NDB:***
  - Emisora/Receptor

La emisora NDB (Non Directional Beacon) es una estación de radiodifusión en AM, para un rango de frecuencias de 190 KHz a 1750 KHz. La antena de la emisora NDB presenta un patrón de radiación omnidireccional, radiando la misma potencia en todas las direcciones (salvo en su vertical, donde presenta un nulo). La potencia va desde 20 W hasta varios KW.

La señal de un NDB es un código Morse de dos o tres letras (su identificativo) . Las emisoras NDB están obsoletas, habiendo sido sustituidas en su mayor parte por el VOR. Con todo son muy baratas de operar y al ser tan antiguas (se usan desde los años 30), están amortizadas, por lo que se mantienen como sistema de respaldo. En su banda de operación, la propagación de onda se realiza por onda de tierra por lo que su alcance es mucho mayor que el del VOR a baja altitud (~500 km). En su contra, la señal NDB es más afectada en largos alcances por las condiciones atmosféricas (especialmente por las emisiones radioeléctricas de las tormentas) y por la conductividad del terreno.

A bordo el ADF se compone del receptor de radio AM y de un indicador de rumbo relativo (RBI, Relative Bearing Indicator). un RBI se compone de un esfera angular y de una aguja. La esfera angular se ajusta con un dial (llamado HDG por Heading) de forma que 0º corresponda con la dirección del morro. La aguja marca la dirección de la estación NDB sintonizada.



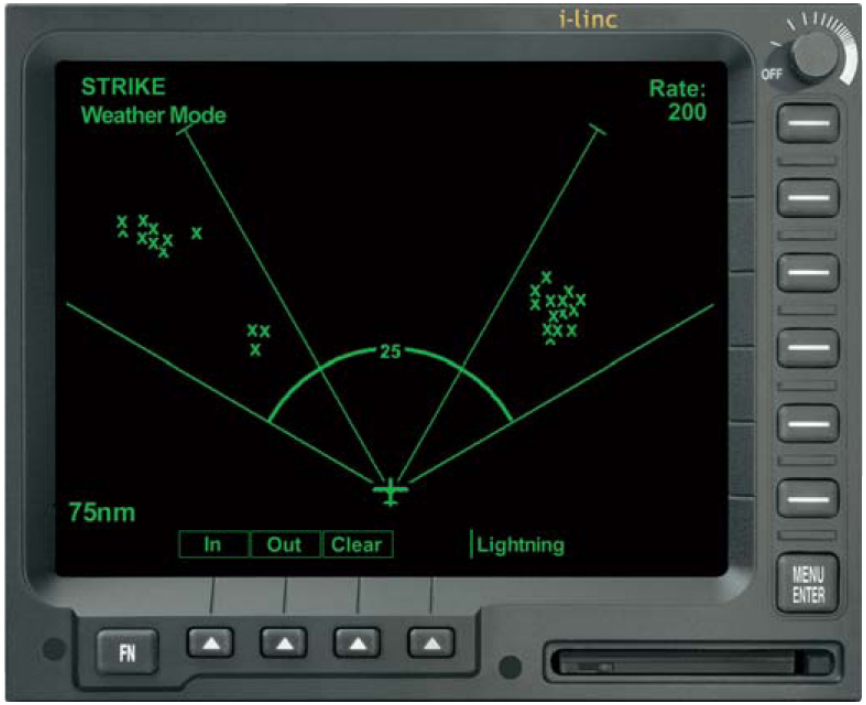
En muchos indicadores RBI se monta también una brújula para poder tener una referencia de Norte Magnético. En este caso la dirección del morro viene indicada por un símbolo (una cruceta con forma de avion). El símbolo se ajusta con el dial HDG para marcar la dirección del morro de la aeronave. Estos indicadores con brújula se llaman RMI (Radio Magnetic Indicator) o RadioBrújula (o RadioCompás).

CAPÍTULO V

Tema 4 Radionavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***ADF/NDB***:
  - Detector de Tormentas

Existe un sensor de rayos que opera detectando y clasificando las emisiones de RF de los rayos. Es posible detectar las tormentas en el ADF (Automatic Direction Direction Finder) o RadioCompás. Sin embargo no es una técnica fiable porque el ADF no está pensado para eso.
El sensor de tormentas ("Storm Scope") se compone de un display electrónico con simbología muy simple, una antena direccional de radiogoniometría y una unidad electrónica.
En el display se presenta una cruz (o un punto coloreado) por cada rayo detectado. Se refresca el display cada algunos minutos para no saturarlo. Los puntos aparecen en una representación polar, con el avión en el centro. La dirección del rayo es relativa al morro de la aeronave.
Indica con relativa precisión la dirección del rayo y con bastante menos la distancia al mismo. Estima la distancia a partir de la potencia de RF recibida, en el supuesto de que todos los rayos radian más o menos lo mismo. El receptor trabaja en la frecuencia de los 50 KHz, más o menos la misma que el ADF, ya que en esa banda es donde radian más eficientemente los rayos.
La antena se compone de tres dipolos: dos de ellos son antenas de bucle magnético, dispuestas ortogonalmente entre sí y la tercera es una antena de látigo. Las antenas de bucle forman un radiogoniómetro, análogo a la antena directiva del ADF y tienen como misión localizar la dirección ("radial") del emisor de RF.



CAPÍTULO V.

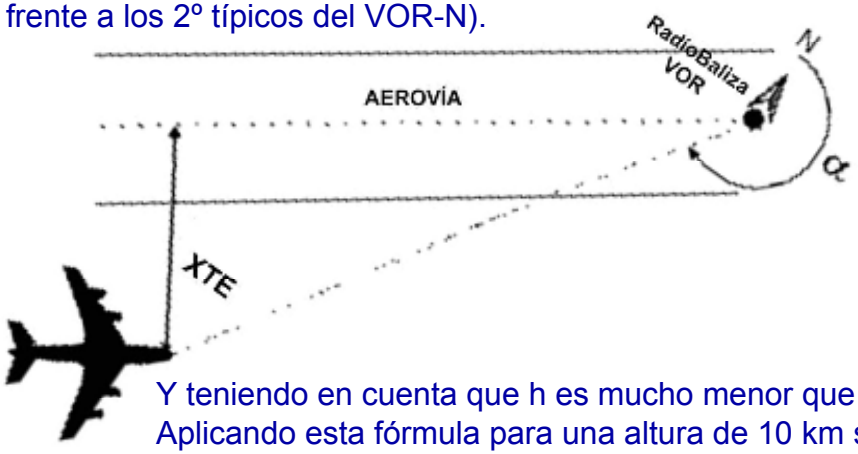
Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***VOR:***
  - Uso y Fase del Vuelo

El sistema VOR ("Very Hign Frecuency Omnirange" o RadioFaro Omnidireccional de VHF) es una radioayuda para la navegación en ruta de corto alcance (~200 mn). Fue desarrollado en EE.UU. y puesto por primera vez en servicio en 1949. El VOR determina el ángulo θ entre la dirección que une la aeronave con la estación VOR y la dirección del Norte Magnético. Conocido el ángulo de VOR y la distancia a éste (por ej., mediante la radioayuda DME), es posible calcular la distancia lateral (o Cross Track Error, XTE) entre el avión y la aerovía. Un VOR transmite, sobre una portadora de VHF con polarización horizontal, dos señales:

- Una señal de referencia omnidireccional de 30 Hz
- Una señal variable con la dirección (o rotatoria) de 30 Hz. La fase de esta señal depende de la dirección en que se encuentre el receptor.

La medida del ángulo se fundamenta en la comparación de la fase entre las dos señales de 30 Hz. El sistema VOR utiliza la modulación espacial de la señal con el ángulo θ o ángulo VOR, con un máximo cuando el eje longitudinal del avión está alineado con la estación VOR. El paso del diagrama por el Norte está también marcado por una señal de referencia, de modo que el avión conoce su "marcación" o ángulo de azimut respecto al Norte, θ, visto desde el VOR, por la diferencia de fase entre la señal de referencia y la señal variable.
Es la radioayuda más utilizada en la navegación continental, por existir muchas estaciones VOR distanciadas un máximo de 200 km. La normativa OACI (Anexo 10) establece una cobertura óptima de VOR para estaciones distanciadas unos 200 km. con potencias de emisión de 200 W para el VOR en ruta y de 50 W para el VORT (VOR Terminal, que sirve de ayuda a la navegación y a la aproximación).
El VOR de Ruta o VOR-N marca la dirección de una aerovía. Cuando trabaja coordinado con un sistema DME, establece un vértice para una aerovía. Proporciona información de Navegación (azimut del radial que une la estación y la aeronave) y de Guiado (seguimiento del radial hacia o désde el VOR). El VOR –T proporciona los mismos servicios en las rutas de aproximación al aeropuerto, con mayor precisión angular (0.5º frente a los 2º típicos del VOR-N).



El radiofaro VOR-N funciona en la banda de frecuencias de 112 a 118 MHz. La frecuencia asignada a cada estación VOR se llama canal (120 en total). La separación entre canales adyacentes es de por lo menos 50 KHz. VOR-T opera en la banda de 108 a 112 MHz, con 80 canales separados por 50 KHz.
A estas frecuencias la propagación es prácticamente en línea recta (de ahí el nombre de "radial") o "línea de visión" (la emisora debe "verse" debe el avión), lo que limita el alcance debido a la curvatura de la tierra en función de la altura del avión.
Si R es el radio de la tierra. d el alcance v h la altura del avión se verifica que :

$$R^2 + d^2 = (R+h)^2 = R^2 + h^2 + 2Rh$$

Y teniendo en cuenta que h es mucho menor que R, se puede despreciar frente a 2Rh, con lo que resulta (d y h en km):
Aplicando esta fórmula para una altura de 10 km se obtienen un alcance de 357 km.

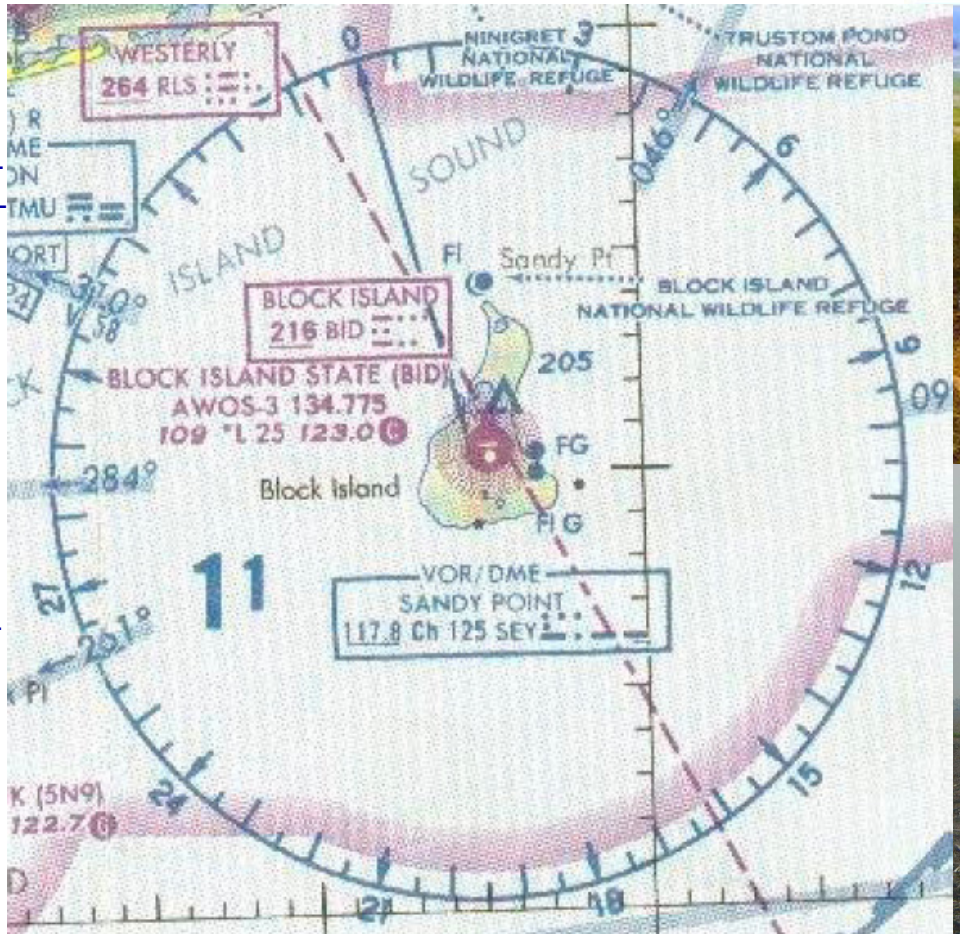
$$d = \sqrt{2Rh} = \sqrt{12732h} = 113\sqrt{h}$$

CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***VOR:***
  - Descripción General

En teoría este alcance es independiente de la potencia (siempre que esta sea suficiente para asegurar el mínimo campo inducido de 90 micro voltios por metro en el avión, exigido por la OACI). El alcance práctico es mejor que el teórico y es función de la potencia emitida, debido a que la onda emitida tiende a seguir la discontinuidad dieléctrica entre la tierra y el aire (formando una onda terrestre guiada).
La precisión VOR exigida por la OACI es de ±2º (para CVOR o Conventional VOR, con confianza de 95% da precisión de,±1.5º), superándola ampliamente el VOR Doppler o DVOR, con menos de 0.5º de error. El DVOR es un sistema compatible con el CVOR ya que usa el mismo receptor; El DVOR sustituye la modulación espacial por el efecto Doppler obtenido desde una antena giratoria (electrónicamente).
Las direcciones VOR se definen en las cartas aeronáuticas siempre como **radiales alejándose de la estación**. En la ilustración, hay una estación VOR/DME en la isla de Sandy Point. La dirección de vuelo 0º indica alejándose de la estación de Sandy Point, en dirección Norte Magnético. En la carta sólo hay una línea para cada radial de una estación VOR concreta. Da lo mismo si se vuela hacia o desde o cruzando la estación, la radial siempre estará en el mismo sitio. Por ejemplo, el rumbo 345º, marcado con una linea rosa punteada, indica la dirección hacia Westerly, alejándose del VOR de Sandy Point. Siempre que el vuelo se desarrolle alejándose de la estación, el curso (y el rumbo si no hay viento) tendrá el mismo número que la radial. Si el vuelo se desarrollase hacia la estación, estaríamos en la misma radial 345º pero el rumbo sería el complementario (165º).



CAPÍTULO V.

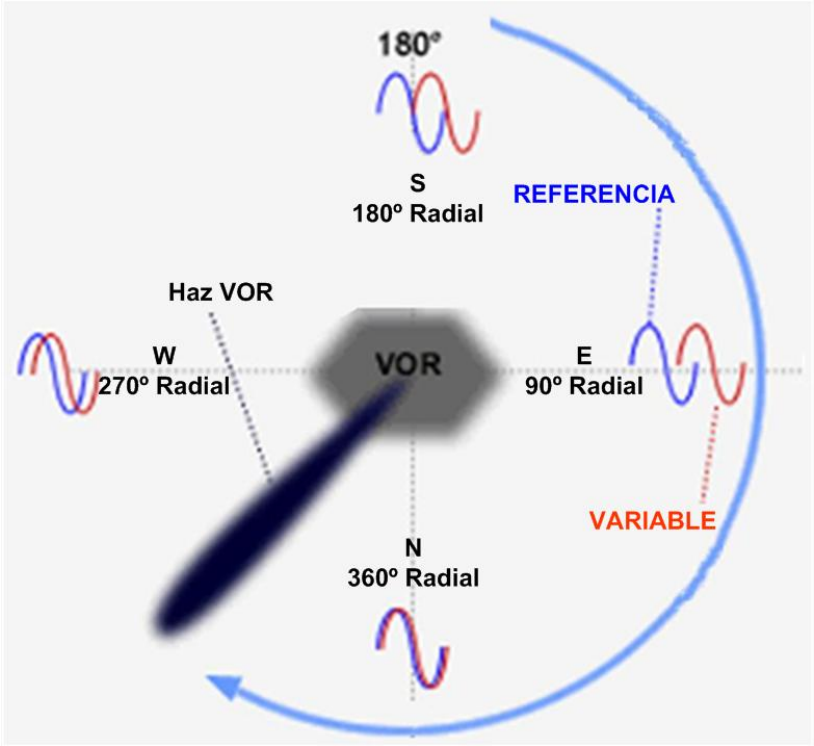
Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

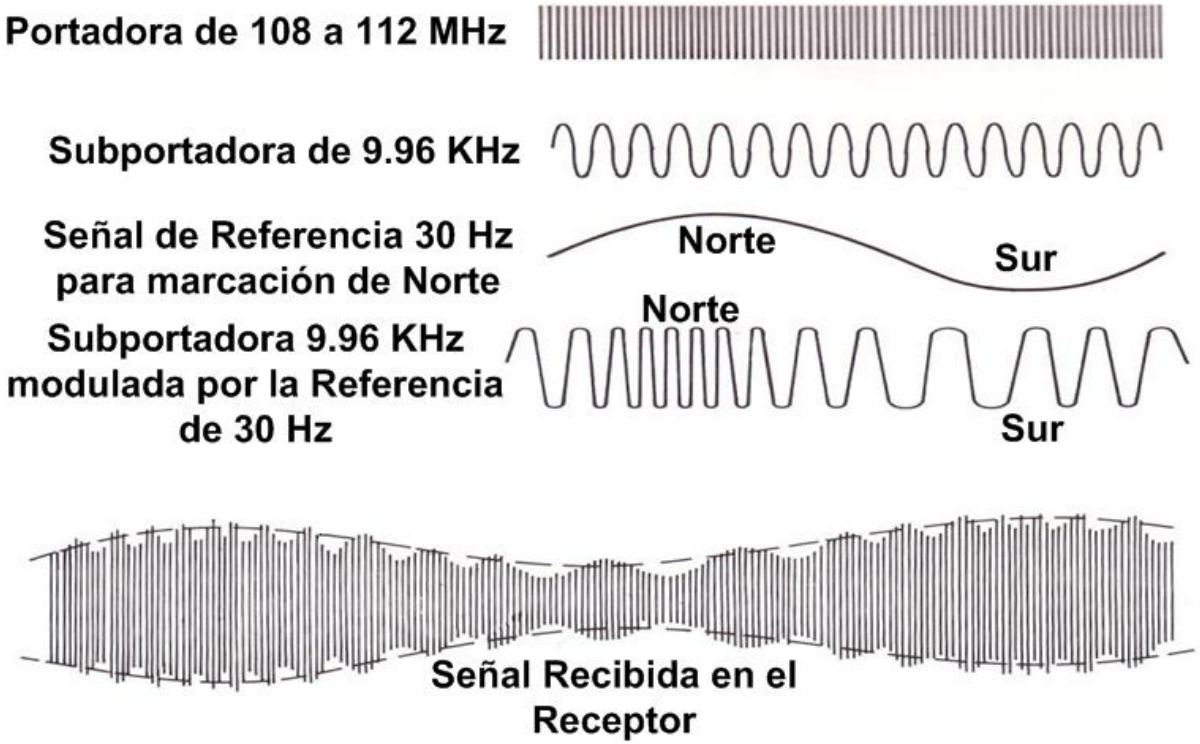
- ***VOR:***
  - Señal del VOR

El VOR opera en la banda de 108 a 118 MHz (VHF), con 200 canales espaciados 50 KHz. Emite dos señales de navegación para dar al avión una información de rumbo, una señal de audio (canal de comunicación normal) y una señal de identificación. Las dos señales de navegación modulan en AM a la portadora, en un 30% y la de identificación la modula, también en AM, al 10%. La identificación se hace en código Morse, con un tono a 1020 Hz, emitiendo dos o tres veces por minuto.

El principio de operación es análogo al de un faro óptico, pero en radiofrecuencia. La estación de tierra radia un patrón cardiode que rota a 30 revoluciones por segundo, generando una onda senoidal a 30 Hz en el receptor del avión (**señal variable**). La estación de tierra también radia una señal omnidireccional, modulada en frecuencia con un tono de 30 Hz fijo (**señal de referencia**). La diferencia de fase entre la señal de referencia y la señal variable cambia directamente con el rumbo del avión.

La señal variable modula en amplitud directamente a la portadora, mostrando además una modulación espacial en fase. Como necesitamos una señal de referencia a 30 Hz y no se puede añadir otra modulación AM a la portadora a 30 Hz (ya está ocupada por la señal variable), se emplea una subportadora a 9960 Hz. Esta subportadora se modula en frecuencia con un seno a 30 Hz (dando un ancho de modulación FM de ±480 Hz). La subportadora modulada de 9960 Hz modula a su vez, en AM, a la portadora, con una profundidad de modulación del 30%.





CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***VOR:***
  - Señal del VOR

$$s_{CVOR}(t) = A_p[1+\frac{30}{100}s_{VAR,CVOR}(\theta)+\frac{30}{100}s_{REF,CVOR}(t))+\frac{20}{100}\cos(2\pi f_{Ident}t)+\frac{10}{100}s_{Audio}(t)]\cos(2\pi f_P t)$$

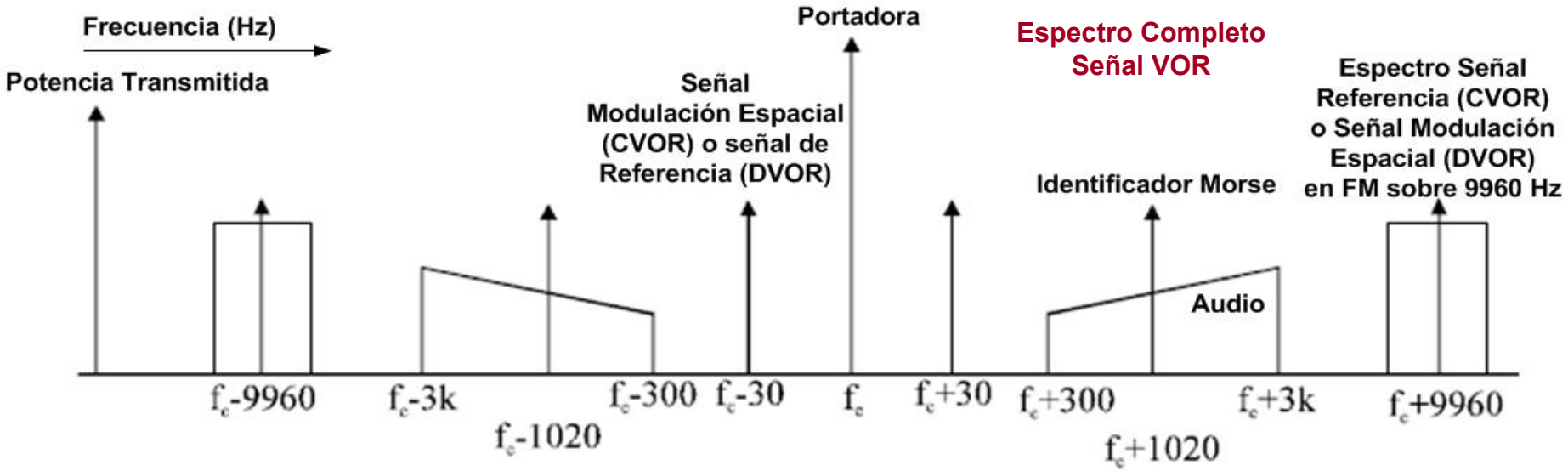
$$s_{VAR,CVOR} = \cos(2\pi f_{VOR}t-\theta), \quad s_{REF,CVOR}(t) = \cos(2\pi f_{SP}t+\Delta f\cos 2\pi f_{Var}t)$$

$$s_{DVOR}(t) = A_p[1+\frac{30}{100}s_{REF,DVOR}(t)+\frac{30}{100}s_{VAR,DVOR}(t,\theta)+\frac{20}{100}\cos(2\pi f_{Ident}t)+\frac{10}{100}s_{Audio}(t)]\cos(2\pi f_P t)$$

$$s_{REF,DVOR}(t) = \cos(2\pi f_{VOR}t), \quad s_{VAR,DVOR} = \cos(2\pi f_{SP}t+\Delta f\cos(2\pi f_{VOR}t+\theta))$$

$$\text{donde } f_{VOR}=30Hz,\ f_{Ident}=1020Hz,\ f_{SP}=9960Hz,\ f_P\in[108,119.75]\text{ MHz},\ s_{Audio}\in[0.3,3]\text{ KHz},\ \Delta f=480Hz$$

La señal del VOR es una señal de VHF compuesta por 4 señales moduladas en AM. Con un porcentaje demodulación del 30% se encuentran la señal variable y la señal de referencia. Además tenemos la señal de identificación, con porcentaje de modulación del 20% y la señal de audio, con un 10% de porcentaje de modulación.
Si se trata de señal CVOR, la referencia es una señal de FM en la subportadora de 9.96 KHz y la variable es una señal de AM. Si se trata de DVOR ocurre lo contrario: la referencia es una señal de AM y la variable es una señal de FM en la subportadora de 9.96 KHz.



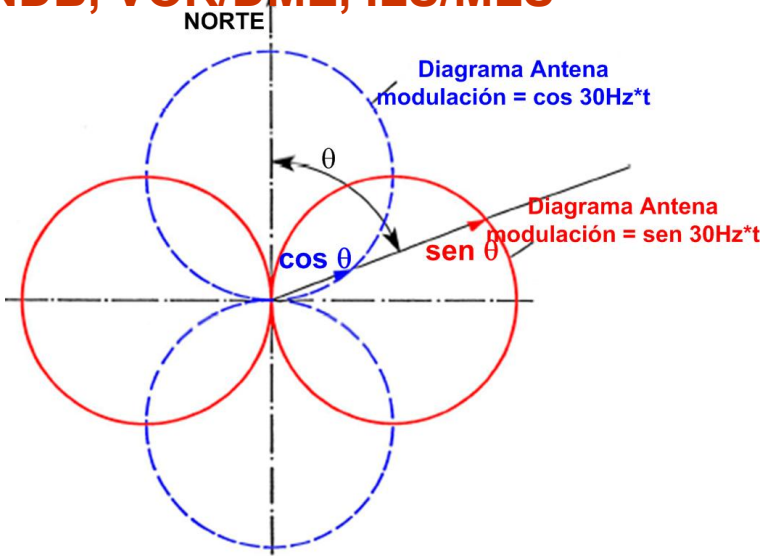
CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***CVOR:***
  - Emisora VOR Convencional

La emisora VOR más sencilla genera la modulación espacial mediante tres antenas: un par de dipolos cruzados (ortogonales entre sí) y una antena de bucle omnidireccional. El diagrama de radiación de un dipolo tiene forma de ocho. Los dos dipolos cruzados forman un ángulo de 90º, por lo que uno de los diagramas de radiación irá con sen θ y el otro con cos θ:

$$V_1(\theta) = V_E \cos(\theta) \quad , V_2(\theta) = V_E \, sen(\theta)$$



Cada antena del dipolo cruzado es alimentada con una señal similar denominada SBO (SideBands Only), con un desfase de 90º:

$$E_1 = E_0 \cos(2\pi f_{VOR} t)\cos(2\pi f_P t)\,, \quad f_P \in [108, 119.75] \text{ MHz}$$
$$E_2 = E_0 \,\text{sen}(2\pi f_{VOR} t)\cos(2\pi f_P t)\,, \quad f_{VOR} = 30\,Hz$$

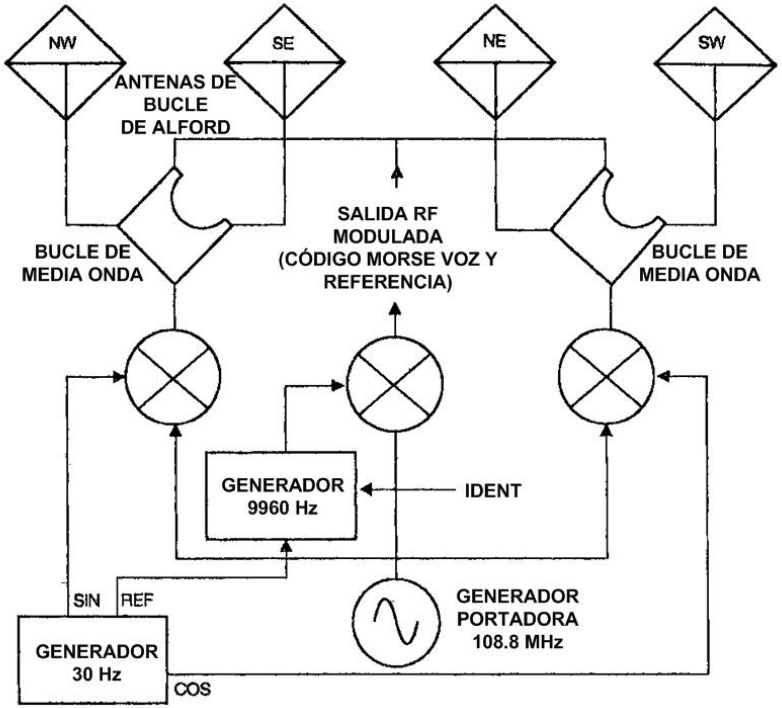
La señal de radiofrecuencia es la suma en el espacio de las señales emitidas por los dos dipolos cruzados:

$$E \propto \cos(2\pi f_P t)\left[\text{sen}(2\pi f_{VOR} t)\cos\theta + \cos(2\pi f_{VOR} t)\,\text{sen}(\theta)\right] =$$
$$= \cos(2\pi f_P t)\left[\text{sen}\,(2\pi f_{VOR} t + \theta)\right]$$

La señal completa en el espacio se tiene cuando se suma una señal de portadora emitida por la antena de bucle. Como es omnidireccional, i.e., no depende de θ, se tendrá la señal completa:

$$E \propto \cos(2\pi f_P t)\left[1 + \text{sen}\,(2\pi f_{VOR} t + \theta)\right]$$

que corresponde a un patrón de radiación cardioide con eje rotando a una frecuencia de rotación de f_{vor} = 30 revoluciones/seg, es decir, la modulación espacial buscada. En la práctica se usan dos pares de antenas de bucle de Alford. Los patrones de radiación son los mismos pero producen una polarización totalmente horizontal (la terna de dipolos tiene componentes residuales de polarización vertical).



CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***DVOR:***
  - Emisora VOR Doppler

El VOR Doppler o DVOR es una mejora de precisión al VOR Convencional o CVOR (precisión de 0.5º frente a 2º respect.). Además se ve menos afectado por las reflexiones de obstáculos cerca de las antenas ya que la direccionalidad no se consigue mediante una ganancia geométrica de la antena sino mediante el efecto Doppler.

La antena DVOR se compone de una circunferencia formada por 26 parejas de antenas de dipolo y una antena de dipolo (omnidireccionales) en el centro. En cada instante sólo hay 3 antenas alimentadas, la central (o referencia) y una pareja. Una antena del par transmite a f_p+9960 Hz y la otra a f_p-9960 Hz. La conmutación del par activo se realiza de modo que desde el receptor el DVOR se ve como un par giratorio de antenas a f_{vor}= 30 revoluciones/seg.

El desplazamiento Doppler conseguido con la rotación aparente es:

$$\Delta f = \frac{v}{\lambda} = \frac{\omega_{VOR} \cdot a\, sen(\theta)}{\lambda} = \frac{2\pi f_{VOR} \cdot asen(\theta)}{c} f_p$$

con v la velocidad de la antena en la dirección del observador (aeronave), c la velocidad de la luz ($3x10^8$ m/s), a el radio de la circunferencia (6.76 m), f_{VOR} =30 Hz la frecuencia de rotación aparente de la antena (30 Hz) y f_p la frecuencia de la portadora de VHF. En el receptor se suma la señal de la antena que se aleja y de la antena que se acerca, cada una con un desplazamiento doppler diferente (±(Vsenθ/λ) respectivamente). La señal suma resultante es una subportadora en 9960 Hz, modulada en frecuencia según la expresión:

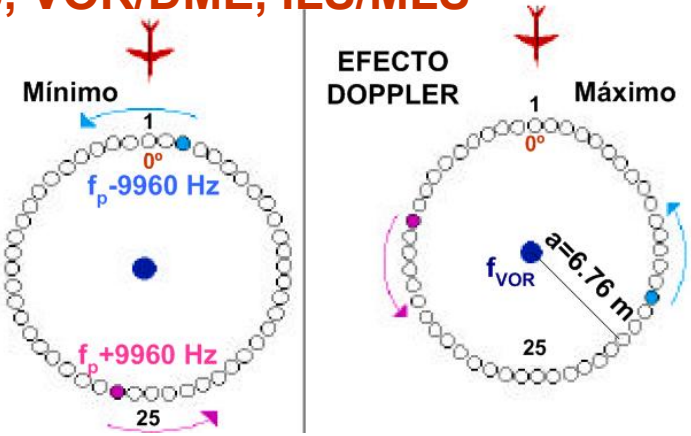
$$s_{VAR,DVOR} = \cos(2\pi f_{SP} t + \Delta f \cos(2\pi f_{VOR} t + \theta))\, sen(2\pi f_p t)$$

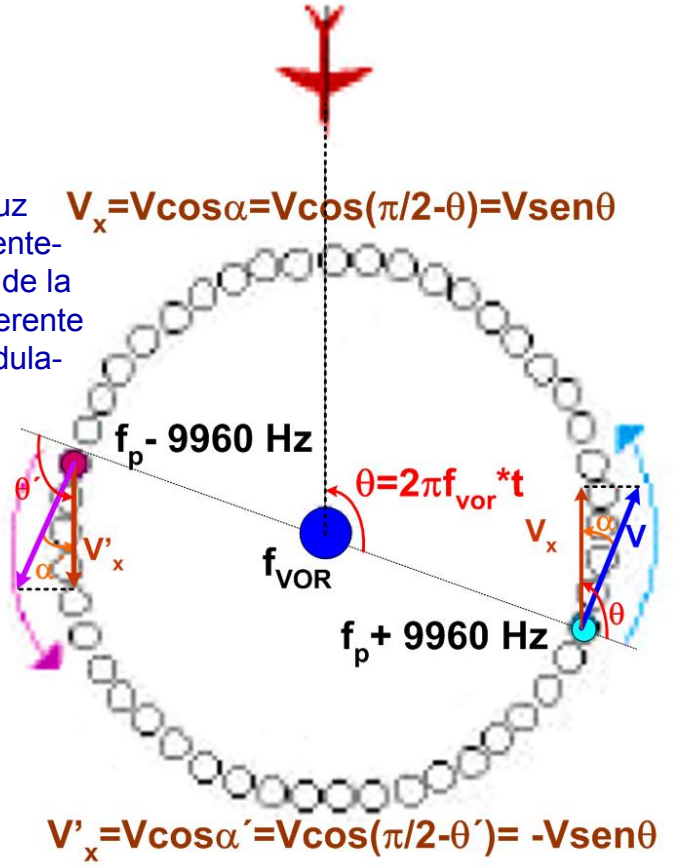
$$\text{con } f_{SP} = 9960\, Hz, \quad \Delta f = \frac{2\pi a}{\lambda}$$

A la señal de subportadora, en el receptor, se le añade la señal recibida de la antena central:

$$s_{REF,DVOR} = (1 + \frac{30}{100} \cos \omega_{VOR} t)\, sen(2\pi f_p t)$$

Para asegurar la compatibilidad con el receptor, es obligatorio que el desplazamiento doppler recibido de cada antena periférica sea Δf=480 Hz. Para la banda de frecuencias de portadora del VOR eso fija el radio de la circunferencia a 6.76 m.





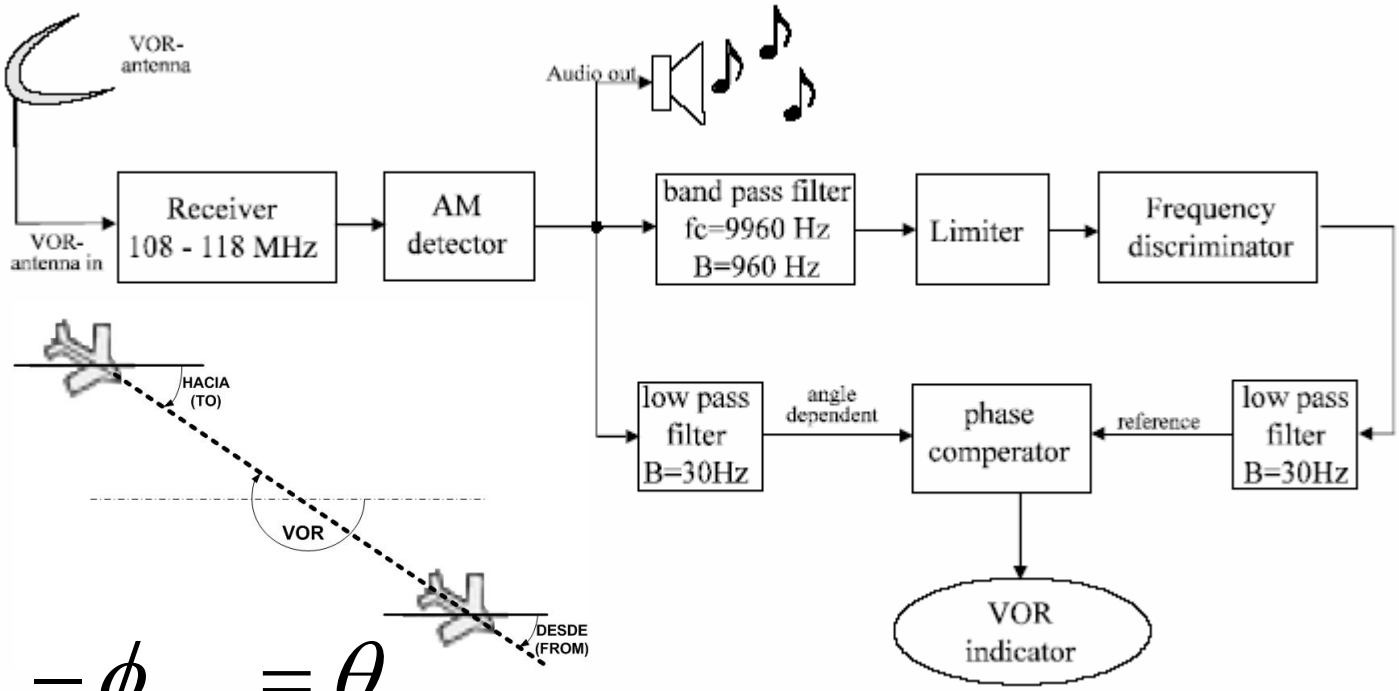
CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***VOR:***
  - Diagrama Bloques Receptor

La parte de RF es un doble receptor AM//FM conectado a un comparador de fase. La salida se filtra para obtener los cuatro canales de información. El canal de voz y el de identificación proporcionan la señal a los amplificadores correspondientes de audio. El canal de referencia se obtiene mediante un demodulador FM compuesto por un filtro para la señal de 9960 Hz que modulaba a la portadora en amplitud. Un discriminador FM obtiene de esta subportadora la señal de 30 Hz de referencia. Otro filtro de 30 Hz obtiene la señal variable espacialmente, obtenida por modulación espacial por la antena giratoria en tierra.
La diferencia de fase entre la señal variable y la de referencia es la marcación desde el VOR (azimut del avión con respecto al VOR cuando el avión se aleja de la estación VOR, marcación FROM, y azimut del VOR visto desde el avión cuando el avión se acerca a la estación VOR, marcación TO).
El receptor VOR es el mismo se trata de una señal DVOR o CVOR, ya que en ambos sistemas el receptor hace las mismas funciones, calcular el ángulo de orientación respecto a la emisora VOR, θ, a partir de la diferencia de fase entre la señal FM (transportada por la subportadora de 9960 Hz) y la señal de AM (transportada por la portadora VHF).

CVOR	DVOR
$\phi_{fm}= 0$	$\phi_{fm}= \theta$
$\phi_{am}= -\theta$	$\phi_{am}= 0$
$\phi_{fm}-\phi_{am}=\theta$	$\phi_{fm}-\phi_{am}=\theta$



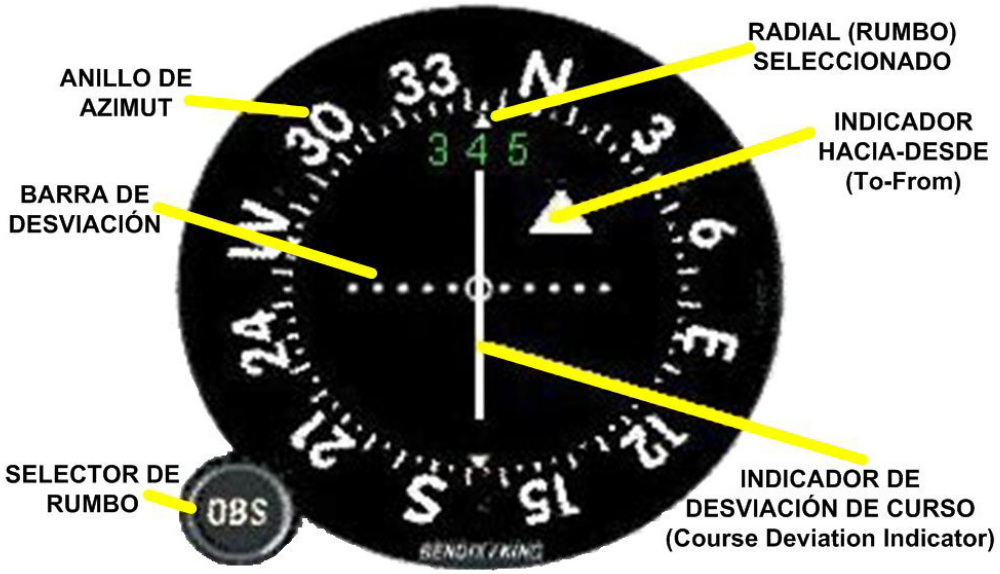
$$\text{Receptor} = \phi_{FM} - \phi_{AM} = \theta$$

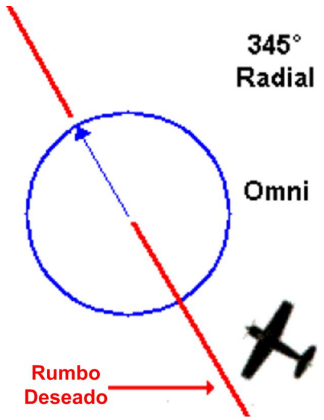
CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***VOR:***
  - Diagrama Bloques Receptor

El indicador VOR es un CDI (Course Deviation Indicator), compuesto por una rosa de los vientos (una marcación de rumbo magnético) y una aguja indicadora de dirección hacia la emisora VOR. La aguja se desplaza hacia la derecha o hacia la izquierda (como un péndulo), indicando la dirección a seguir para volver al rumbo seleccionado. La barra de desviación está marcada en segmentos de 2º. Además aparece un indicador TO (hacia) o FROM (desde) para el sentido de la dirección a la estación VOR. La rueda OBS (OmniBearing Selector o Selector de Rumbo) sirve para girar el anillo de azimut, de modo que el piloto pueda seleccionar un rumbo VOR respecto del que se vuela HACIA (TO) o DESDE (FROM).
En las ilustraciones se ha seleccionado la radial de 345º. En la ilustración de la izquierda, el CDI indica que la aeronave está al Sur de la estación VOR, con un curso magnético de 345º. La aeronave no está en el radial de 345º porque el radial se extiende desde la estación VOR hacia el Norte. La aeronave está en el radial recíproco, que es el que apunta hacia ella (corresponde con el radial 165º, alejándose de la estación, como todos los radiales); esa indicación proviene de la flecha TO (o indicador HACIA).
En la ilustración de la derecha, la aeronave está fuera del curso previsto: la aguja del CDI se ha desplazado 4º a la izquierda, indicando que la aeronave debe desplazarse hacia la izquierda para recuperar el rumbo 345º hacia (o radial 165º). Con el indicador VOR el piloto siempre gira el avión con el objeto de que la aguja de curso recupere la posición vertical.



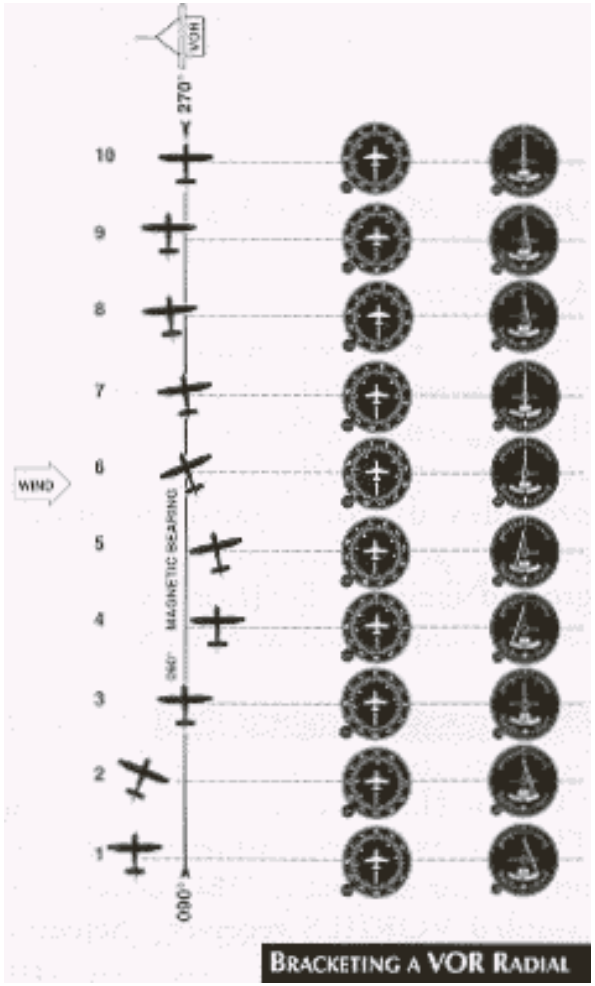


CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***VOR/DME:***
  - VOR/DME

El sistema de aerovías de un país se apoya actualmente en estaciones combinadas VOR-N/DME-N (N de navegación). Técnicamente la combinación se hace añadiendo una antena DME a la antena central del DVOR (o adjuntando una antena DME al grupo de antenas CVOR). Si el VOR proporciona una indicación de rumbo , el DME entrega una marcación de distancia hasta la estación, así como la velocidad y el tiempo estimado hasta el sobrevuelo de la estación. Con estos datos el piloto puede ubicarse con precisión y seguir el rumbo hacia el VOR/DME: esta trayectoria se denomina “volar sobre la aerovía”.



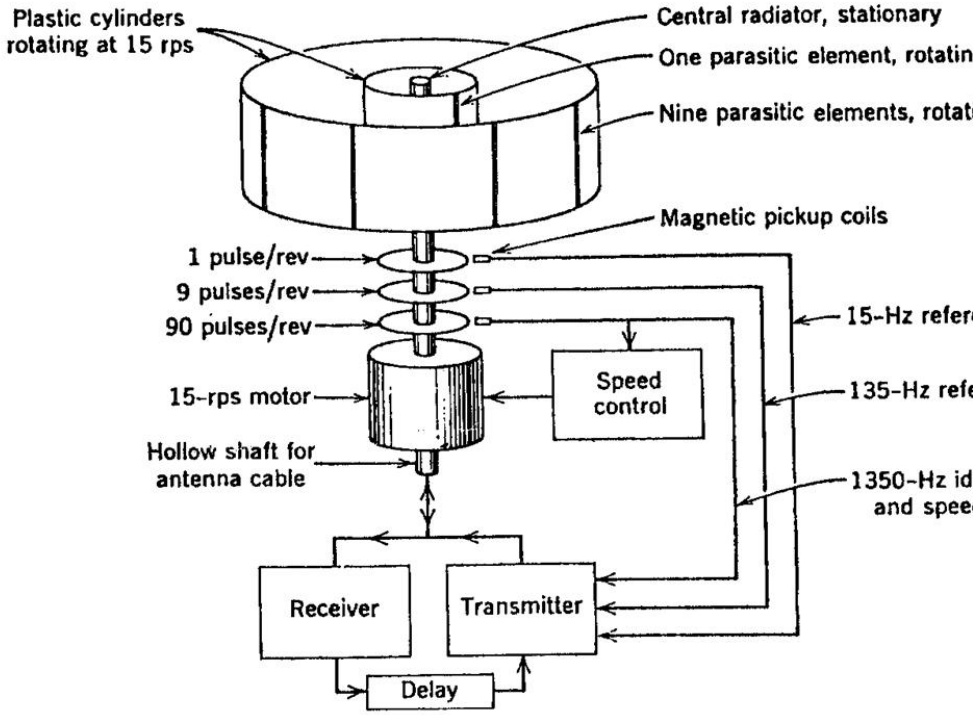
La sintonía de un canal VOR/DME se realiza captando la señal VHF del VOR. Existe una asignación fija del canal DME correspondiente a cada VOR de la carta de navegación por lo que es posible, en el receptor, automatizar la sintonía del DME: el piloto sólo tiene que sintonizar el canal VOR.

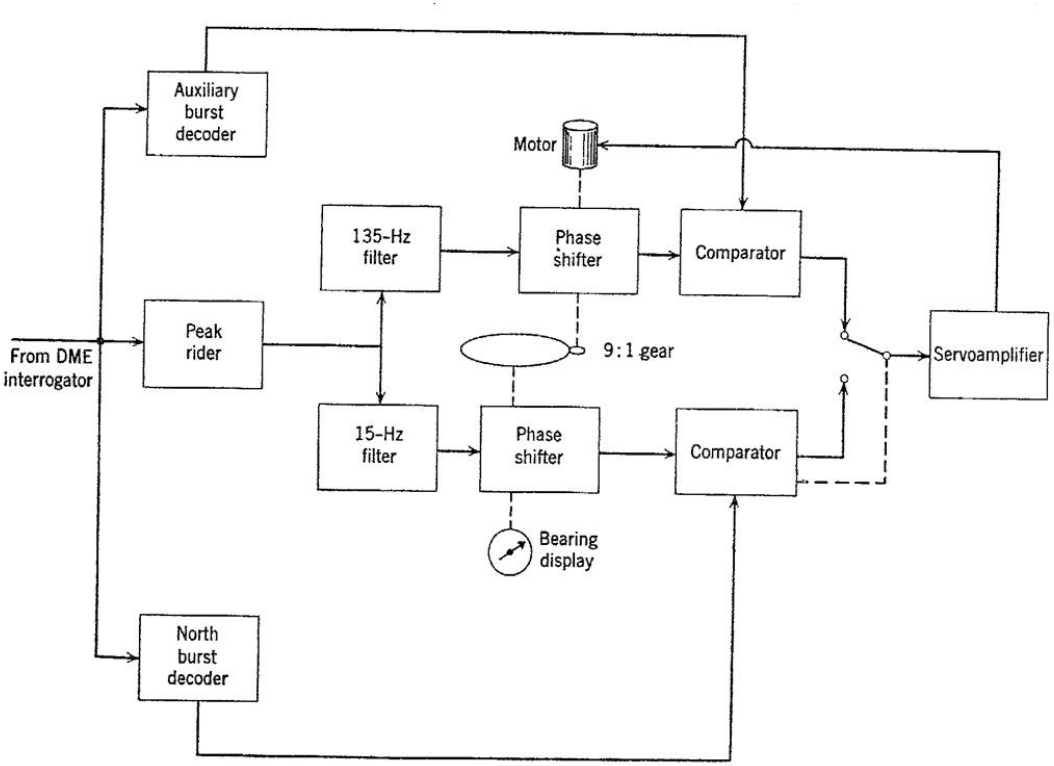
CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***VOR/DME:***
  - TACAN-VOR/TAC

El sistema TACAN (“Tactical Aid to Navigation”) es una radioayuda de navegación militar, aunque puede usarse por la navegación civil. Es compatible con el DME, por lo que puede usarse directamente por él.
El TACAN utiliza la polarización vertical y no es compatible por lo tanto por el VOR, aunque se puede instalar junto a un VOR para formar una estación conjunta VOR/TACAN (VORTAC), en cuya instalación se coloca la antena del TACAN sobre la del VOR.
De esta forma conjunta TACAN, DME y VOR, la estación puede usarse por los aviones equipados con TACAN (en general los militares) y los equipados con VOR/DME (civiles y militares).
En esencia el TACAN es un DME modulado en modulación espacial (con diagrama giratorio) para obtener la señal variable espacialmente del VOR, y cuya señal de referencia se emite en forma de impulsos codificados.





CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***DME:***
  - Descripción General

El DME ("Distance Measurement Equipment") es un sistema de radar con respuesta activa (secundario), usado para medir la distancia entre el interrogador y un respondedor (transponder). Como uso secundario, el receptor DME también da una indicación de velocidad respecto al suelo (a partir de la tasa de cambio de la distancia medida) y de tiempo de vuelo hasta la estación transpondedora (a partir de la distancia oblícua y la velocidad del avión). El interrogador es un equipo embarcado y el respondedor es la ayuda a la navegación en tierra. El alcance de un transpondedor DME típico coincide con la cobertura de un VOR, ~200 mn.

El receptor DME mide el tiempo de propagación de una señal de radio en banda L en su camino desde el interrogador a bordo de la aeronave hacia el transpondedor en tierra y vuelta al interrogador, es decir, mide la distancia usando la diferencia de tiempos entre tranmisión y recepción. La distancia medida es la distancia real R (o distancia oblícua) y no la distancia lateral D sobre el mapa. Si la distancia oblícua R es tres veces la altitud de vuelo o mayor, el error es despreciable. Para encontrar la distancia D sobre el mapa es necesario medir la altura de vuelo H (por ejemplo con el radioaltímetro) para calcular:

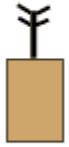
$$D = \sqrt{R^2 - H^2}$$

La indicación del DME se utiliza para la navegación en ruta y para actualizar la medida de distancia del inercial (DME-N o DME de Navegación), así como para maniobras de aproximación y aterrizaje (DME-P o DME de Precisión). Generalmente se asocia el DME-N al VOR, formando así una estación combinada VOR/DME que da al avión la información de distancia a la estación y rumbo a la misma. Fue adoptado por la OACI en 1960 y es usado en todas las rutas de aerovías.

A cada frecuencia VOR le corresponde un canal DME determinado, por lo que el piloto sólo tiene que seleccionar una frecuencia VOR y el receptor DME, automáticamente seleccionará el canal DME asociado (modo de sintonía remota o RMT, Remote Tuning). El transpondedor DME de tierra se identifica a si mismo con una señal de identificación cada 30 segundos. La señal de identificación sirve para localizar en el mapa a cada estación transpondedora DME.

En el receptor del interrogador de cada aeronave se realiza un proceso de defruiting para distinguir que los pulsos recibidos corresponden a la respuesta a su interrogación y no a la respuesta a la interrogación de otra aeronave cercana. Para hacer el defruiting la frecuencia de repetición de impulsos (Pulse Repetition Frequency, PRF) varía desde un máximo de 150 pares de pulsos/sec (modo de búsqueda o search) hasta un mínimo de 24 pares de pulsos/sec (modo de seguimiento o tracking). Una vez identificado en el receptor de a bordo el par de pulsos de respuesta correcto (lo que lleva 1 segundo aproximadamente) se procede a la medida de la distancia. Ésta se realiza midiendo el tiempo entre la pregunta y la respuesta, restando 50 μs (retardo introducido en el transpondedor de tierra) y convirtiendo el tiempo en distancia (12.6 μs por milla).

Para el DME-N la precisión es de 90 m; para el DME-P la precisión es de 15 m a 2 millas de distancia entre aeronave y transponder.



Airborne DME measures elapsed time required for exchange of signals and converts into distance and ground speed.

$$d = \frac{c}{2(t - 50\mu s)}$$

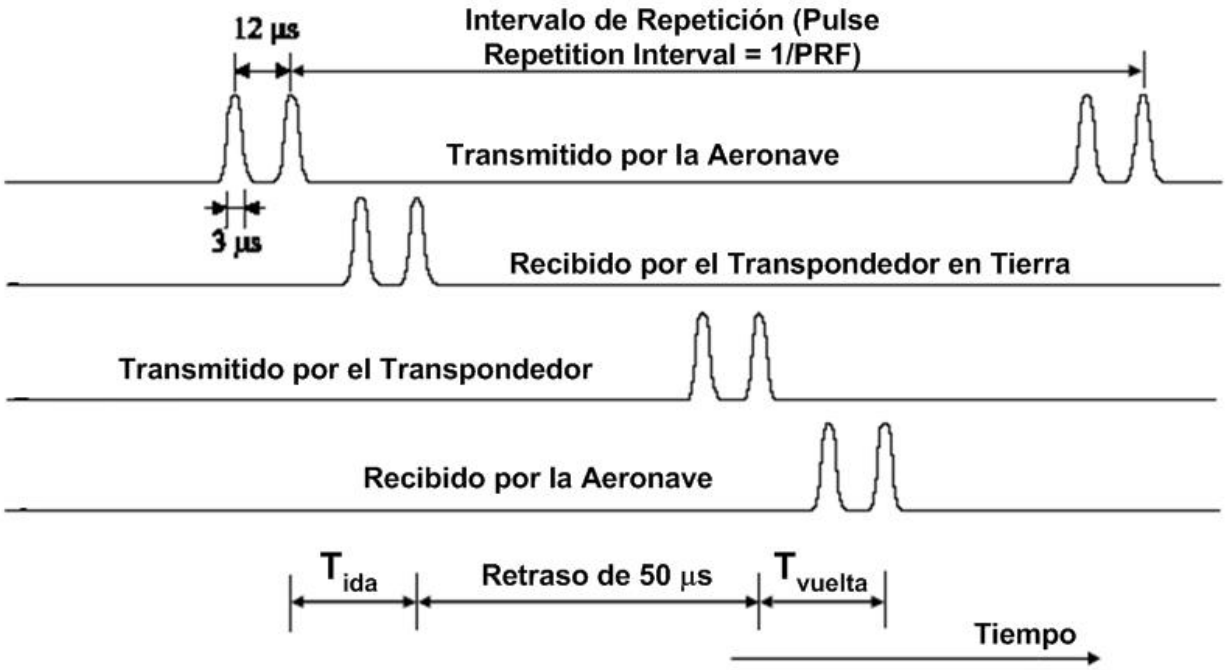
CAPÍTULO V.

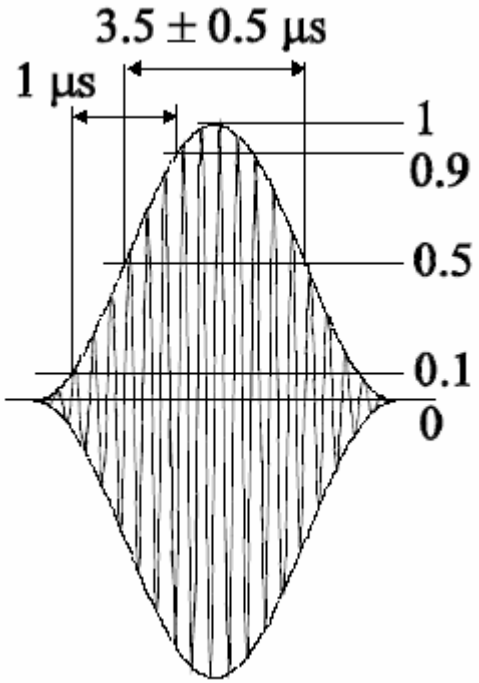
Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***DME:***
  - Características de la Señal

En el DME hay dos tipos de señal, la enviada por el interrogador de a bordo y la respondida por el transponder de tierra. El interrogador funciona en la banda de frecuencias de 1025-1150 MHz (UHF, banda L), con polarización vertical. La frecuencia DME seleccionada por el piloto es la frecuencia de interrogación y constituye un canal (en total hay 126 canales de 1 MHz de anchura cada uno).
La respuesta del transponder de tierra al avión, retrasada un tiempo fijo de 50 μs desde la pregunta, se hace 63 MHz por encima (canales X, 1151-1213 MHz) o por debajo (canales Y, 962-1024 MHz) de la frecuencia de interrogación. Tanto la interrogación como la respuesta consisten en pares de impulsos modulados en amplitud (AM) de 3.5 μs y distanciados 12 μs para la respuesta. La tasa de repetición de parejas de pulsos está entre 5 parejas por segundo hasta 150 parejas por segundo. La modulación tiene forma $\cos^2$ para ahorrar ancho de banda. Enviar pares de pulsos aumenta la protección de la señal contra interferencias o ruido y también incrementa la potencia transmitida. El interrogador de a bordo da una potencia transmitida de 100 W y el transponder en tierra entrega una potencia efectiva de 20 kW.

$$d = \frac{c}{2(T_{ida} + T_{vuelta} - 50\mu s)}$$





CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

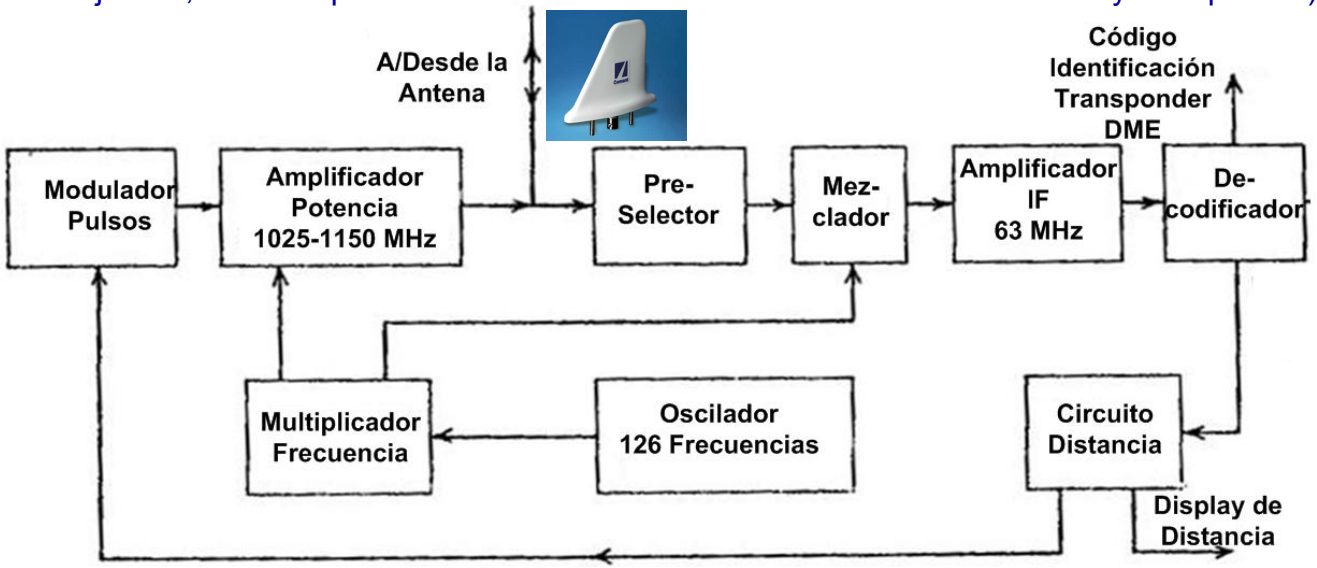
- ***DME:***
  - Diagrama de Bloques Interrogador

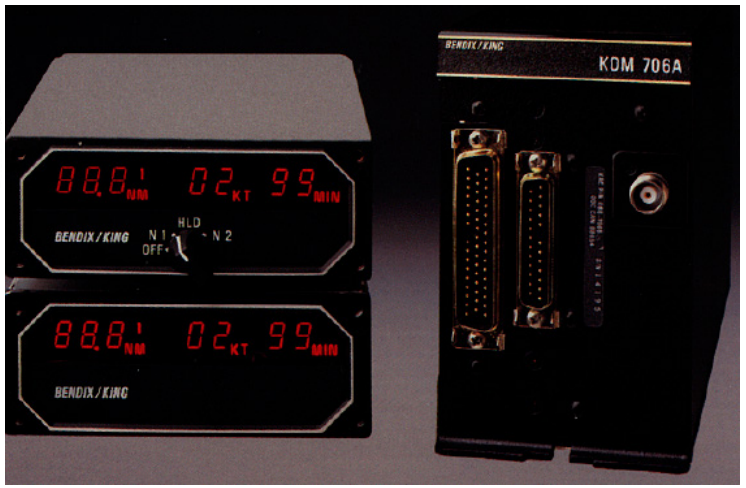
Cada transpondedor DME trabaja en la misma frecuencia para todas las aeronaves por lo que el interrogador, con el fin de conocer las respuestas que corresponden a las propias interrogaciones, hace variar aleatoriamente el periodo de repetición de éstas. El inconveniente mayor del sistema es que el transponder debe atender a las aeronaves una a una, por lo que es necesario, en el receptor, seguir un procedimiento de dos fases (búsqueda y seguimiento).

El interrogador DME puede operar de dos modos: en búsqueda y en seguimiento. En modo de búsqueda trasmite 150 parejas de pulsos por segundo. Esta tasa de repetición de pulsos tan alta es necesaria para obtener información suficiente del transponder durante el periodo de adquisición, durante el cuál aún no se han determinado ni la distancia al transponder ni la velocidad relativa.

Durante la búsqueda, el receptor genera una puerta de seguimiento de 10 μs de ancho, sincronizada con la tasa de repetición de pulsos. La puerta se desplaza, con un retardo variable equivalente al rango entre 0 mn y 300 mn respecto al pulso transmitido. Esta puerta de seguimiento selecciona las parejas de pulsos recibidas, de modo que sólo si se produce una coincidencia entre la puerta y la pareja de pulsos recibida, es pasada la pareja al circuito de integración. Para una frecuencia de 150 parejas/seg, la puerta tiene que abrirse y cerrarse unas correspondientes 150 veces/seg.

En modo de seguimiento la tasa de repetición de pulsos se establece en 25 interrogaciones/seg. La misma puerta de seguimiento conmuta en sincronía con el pulso recibido, ajustándose a la distancia variable entre la aeronave y el transponder. Si la respuesta cae en la zona inicial de la puerta, ésta avanza un pequeño lapso; si la respuesta cae en la zona final, la puerta es retrasada. La OACI exige un error de medida máximo para el DME-N de 900 m aunque los instrumentos DME-N mejoran esa cifra hasta unos típicos 90 m (en el DME-P o de Precisión usado en el ILS mejorado, el error típico es de 15 m a 2 millas de distancia entre aeronave y transponder).





CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***DME:***
  - Diagrama de Bloques Interrogador

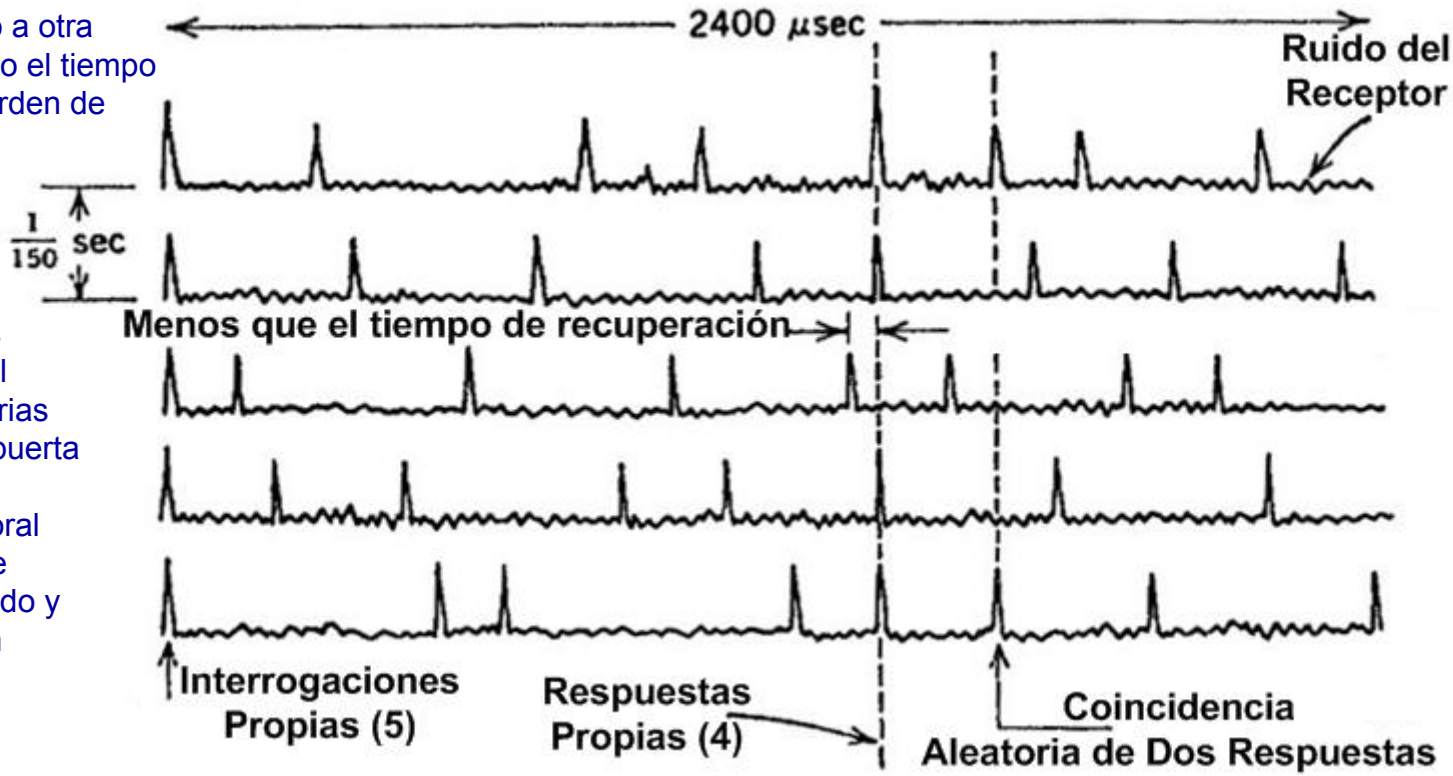
El receptor de a bordo necesita un circuito de defruiting para combatir la interferencia de impulsos producida por la presencia de otras interrogaciones/respuestas correspondientes a otros aviones. Es el mismo problema de fruiting que aparece en el proceso del radar secundario de vigilancia y recibe una solución similar.

En la figura se muestra una representación de osciloscopio (o tipo A) de las señales recibidas. El origen de tiempos se sitúa en la generación del primer impulso de interrogación desde el interrogador de a bordo. Asumiendo una distancia máxima de 200 mn, la ventana de recepción tendrá una duración de 2400 μs. A 3000 pares de pulsos por segundo de media emitidos por el transponder de tierra eso supone capturar un total de ~7 pulsos en la ventana de recepción. De esos 7 pulsos, los correspondientes a interferencia estarán espaciados aleatoriamente. Sólo los pulsos enviados por el interrogador estarán separados por 12 μs. En la traza de la señal eso significa que los pulsos de respuesta siempre aparecerán en el mismo sitio. La línea punteada muestra la coincidencia de varios pulsos en la misma posición en diferentes trazas.

En la traza nº3 la respuesta no está: eso es porque el transponder ha respondido a otra aeronave y todavía no ha transcurrido el tiempo de separación (o recuperación, del orden de 100 μs).

El circuito de defruiting del receptor DME trabaja sobre la hipótesis de que, en un intervalo de tiempo dado, habrá muchas más respuestas deseadas que respuestas no deseadas (interferencias). Para determinar cuál es la respuesta, compara entre sí varias trazas memorizadas (mediante una puerta de distancia, modo de búsqueda).

Una vez localizada la posición temporal de la respuesta, bloquea la puerta de distancia sobre el instante determinado y realiza un seguimiento de la posición de ese pulso adaptando la tasa de conmutación de la puerta (modo de seguimiento).



CAPÍTULO V.

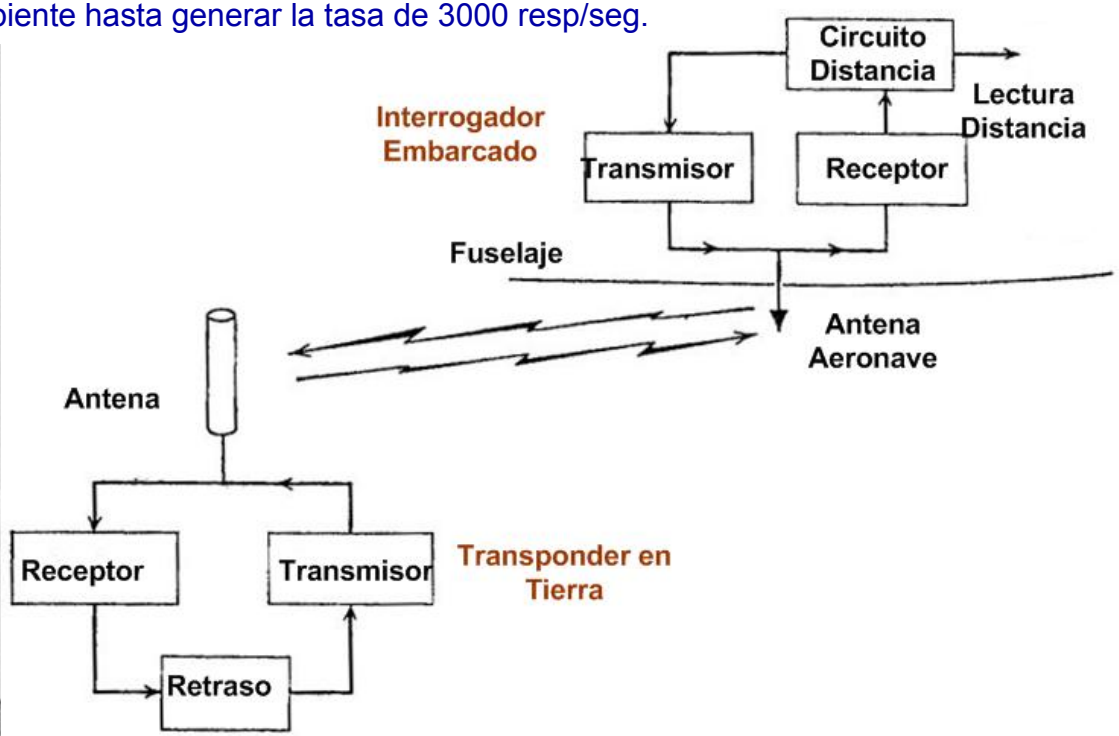
Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***DME:***
  - Equipo DME en Tierra

El equipo en tierra es un respondedor o transpondedor, que consta de un receptor/transmisor que emite la respuesta. La potencia suele ser de 20 kW, suficiente para responder a todos los aviones en un radio de 300 km.). El transponder se limita a reemitir la señal recibida del interrogador a bordo de la aeronave, desplazando la respuesta a un canal diferente (±63 MHz) para evitar el clutter de suelo. El tiempo de latencia entre interrogaciones es de 100 microsegundos.
En el diseño de un transponder DME se supone que el 95% de las aeronaves usan el DME en fase de seguimiento, con un ritmo que no excede las 25 interrogaciones por segundo. El 5% restante estará en fase de búsqueda, con un ritmo máximo de 150 interrogaciones por segundo, por lo que cada avión envía:

5% *150 + 95%* 25 = 30 interrogaciones (redondeando)

Si hay 100 aviones usando simultáneamente el DME, se originan 3000 respuestas. Los DME se diseñan según el principio de uso constante (Constant Duty Cycle). Se asegura un CDC de 3000 respuesas por segundo. En caso de que haya más de 100 usuarios, se atiende a los 100 más próximos. El principio CDC obliga a que siempre haya 3000 respuestas por segundo. Si no hay suficientes aviones, se ajusta automáticamente la ganancia del transponder para que salte con el ruido ambiente hasta generar la tasa de 3000 resp/seg.



CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***ILS:***
  - Uso y Fase del Vuelo

El mayor enemigo de la navegación aérea es la baja visibilidad y especialmente en las operaciones de aproximación, aterrizaje y despegue ya que en esos momentos es imprescindible tener referencias visuales del entorno próximo y en particular del terreno. En un avión, el aterrizaje es una operación de precisión, en ocasiones irreversible, que se realiza entre 300-400 Km/h y perdiendo altura continuamente. De ahí la necesidad de disponer de un procedimiento y unas ayudas visuales e instrumentales que garanticen total seguridad.
En lo referente a la aproximación y el aterrizaje, las operaciones de baja visibilidad se dividen en categorías dependiendo de los mínimos meteorológicos y de los objetivos operacionales que se pretendan conseguir:

- **Operación de Categoría I** : Aproximación y aterrizaje de precisión por instrumentos hasta una altura de decisión no inferior a 60 m y con una visibilidad no inferior a 800 m o un alcance visual en la pista (RVR: Runway Visual Range) no inferior a 550 m.
- **Operación de Categoría II** : Aproximación y aterrizaje de precisión por instrumentos hasta una altura de decisión inferior a 60 m pero no inferior a 30 m y un RVR no inferior a 350 m.
- **Operación de Categoría IIIA**: Aproximación y aterrizaje de precisión por instrumentos: hasta una altura de decisión inferior a 30 m, o sin altura de decisión; y con un RVR no inferior a 200 m.
- **Operación de Categoría IIIB**: Aproximación y aterrizaje de precisión por instrumentos: hasta una altura de decisión inferior a 15 m, o sin altura de decisión; y un RVR inferior a 200m pero no inferior a 50 m.
- **Operación de Categoría IIIC**: Aproximación y aterrizaje por instrumentos sin limitaciones de altura de decisión ni de RVR

Se entiende como altura de decisión a la del punto de la aproximación final en el que el piloto debe decidir continuar el aterrizaje si tiene referencias visuales externas (luces de aproximación o de pista) o iniciar una maniobra de aproximación frustrada si no las tiene. Por otra parte el alcance visual en la pista o RVR se define como la distancia a la que un piloto situado a 5 m de altura sobre el eje de pista, puede ver las señales de la superficie de la pista o las luces que la delimitan o identifican su eje.

Aprox.Visual **CAT I** **CAT II** **CAT III a** **CAT III b**

CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

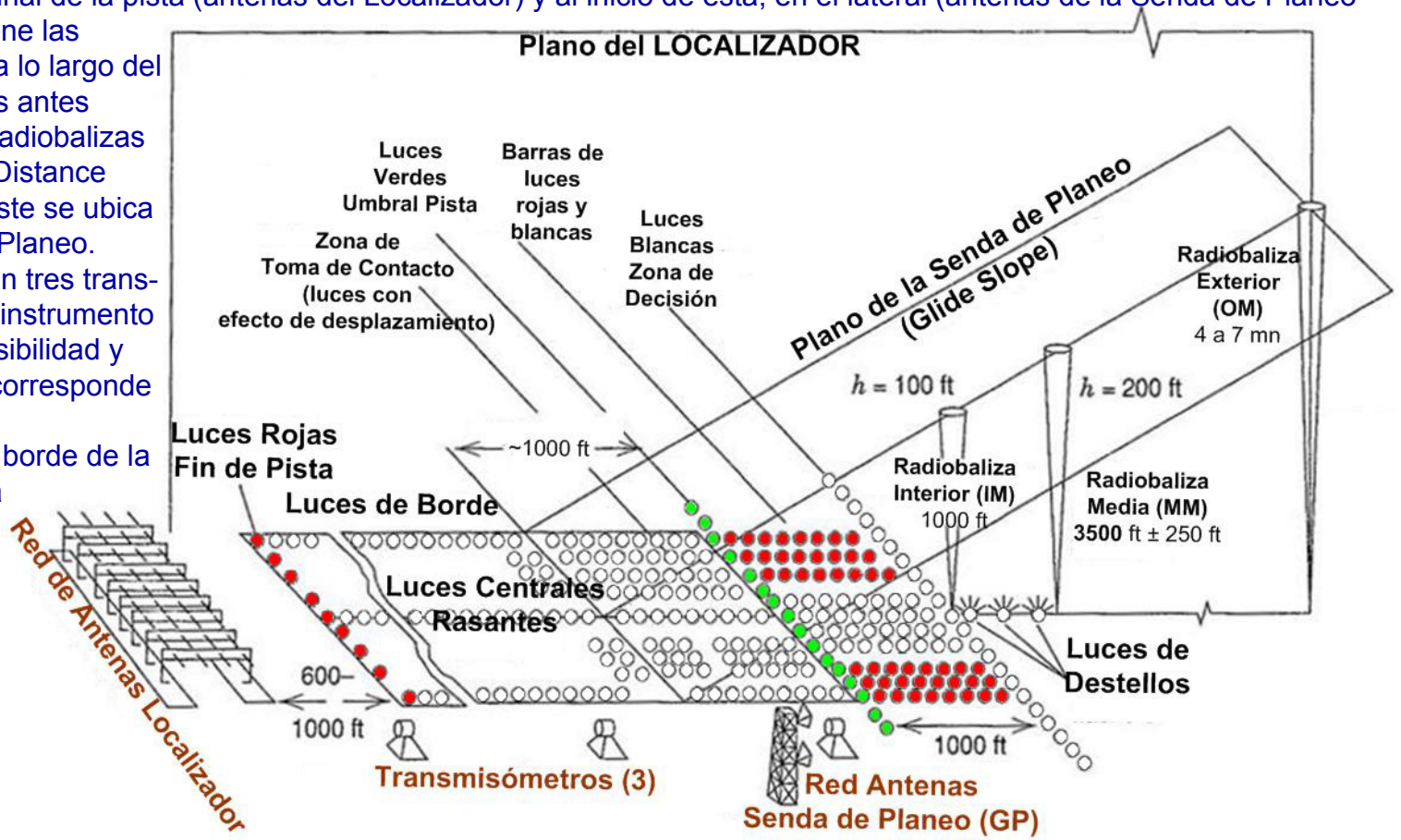
- ***ILS:***
  - Senda de Aproximación

La senda de aproximación es el camino seguido por la aeronave para proceder al aterrizaje en condiciones de baja visibilidad (Instrument Flight Rules) y también como apoyo para aterrizaje en condiciones de buena visibilidad (Visual Flight Rules, usando las marcas de pista durante el día y las luces de pista durante la noche). Una senda de aproximación es un camino virtual marcado por una radioayuda basada en haces de radio-frecuencia (como el Instrument Landing System, ILS, o el Microwave Landing System, MLS) o por un sistema de navegación satélite de alta presición (Ground Base Augmentation System, GBAS, una extensión de sistema GPS). La senda de aproximación se compone de la intersec-ción del plano de la senda de planeo con el plano del localizador. El plano del localizadores ortogonal a la línea central de pista; el plano de la senda de planeo forma un ángulo de entre 2º a 4º (recomendado 2.5º) con el plano de la pista.

Las antenas del ILS/MLS se sitúan al final de la pista (antenas del Localizador) y al inicio de ésta, en el lateral (antenas de la Senda de Planeo o Glide Slope). Si el aeropuerto mantiene las radiobalizas ILS, éstas se encuentran a lo largo del eje de la pista, en diferentes posiciones antes del inicio de ésta. En caso de que las radiobalizas estén suplementadas con un DME-P (Distance Measurement Equipment-Precision), éste se ubica adyacente a las antenas de Senda de Planeo.

A lo largo del borde de la pista se sitúan tres trans-misómetros. Un transmisómetro es un instrumento electroóptico para medir el grado de visibilidad y por tanto establecer la Categoría que corresponde en cada instante.

Hay 3 transmisómetros, situados en el borde de la pista donde se hallan las antenas de la senda de planeo



CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***ILS:***
  - Principio de Funcionamiento

El **ILS (Instrument Landing System, Sistema de aterrizaje por instrumentos**) es un sistema de aproximación por instrumentos basado en haces de radiofrecuencia que proporciona posicionamiento en latitud, longitud y radial de precisión durante la fase de aproximación y aterrizaje. En caso de aterrizaje en condiciones de visibilidad CAT III, también da guía a lo largo de la superficie de la pista. ILS sólo proporciona servicio en cada pista en que se encuentre instalado y no ofrece servicios de guiado para aeronaves en tierra haciendo taxi.

Al encontrarse el avión en un espacio tridimensional, necesita tres parámetros para definir su posición:

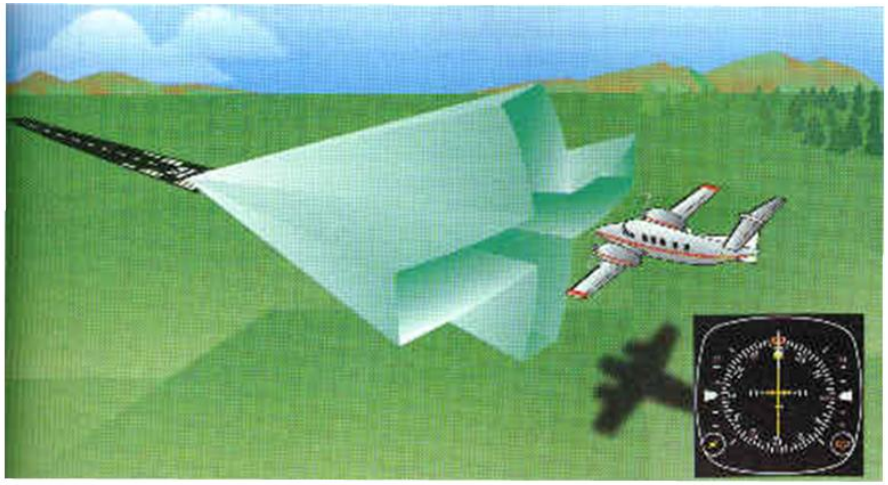
- en el plano horizontal, desplazamiento en acimut con respecto al eje de pista y su prolongación.
- en el plano vertical que pasa por el eje de pista, desplazamiento con respecto a la trayectoria de descenso establecida como segura por encontrarse por encima de todos los obstáculos.
- la distancia hasta el punto en que comienza la superficie de la pista que puede ser utilizada para el aterrizaje.

Para proporcionar esta información de forma continua al piloto, se utilizan dos sistemas radioeléctricos complementarios, el **ILS y el DME-P**, divididos cada uno en dos segmentos, los equipos de tierra instalados en el aeropuerto y los instrumentos de a bordo instalados en el avión.

El sistema ILS de tierra se divide en dos subsistemas, el Localizador y la Senda de Planeo:

- El *Localizador* (LLZ) es una emisora que proporciona guía lateral mediante de dos haces de radio en VHF. Los dos haces definen un plano vertical que pasa por el eje de pista y su prolongación y proporciona la información de desplazamiento acimutal con respecto a ese plano. Las antenas del localizador se sitúan más allá del extremo de pista y dan información de guiado durante toda la maniobra de aproximación y aterrizaje e incluso durante el rodaje por la pista. El localizador además transmite en código Morse el indicativo de la estación.

- La *Senda de Planeo* (GP, Glide Path) define por medio de dos haces un plano inclinado que pasa de forma segura por encima de los obstáculos que pueda haber en la aproximación. Además la pendiente de este plano permite a las aeronaves realizar un descenso a 2.5º-3º de pendiente.
Las antenas de la senda de planeo se instalan próximas al umbral (THR: Threshold) a un lado de la pista y la información de guiado que proporcionan lleva a la aeronave hasta el punto de contacto con la pista.



CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***ILS:***
  - Principio de Funcionamiento

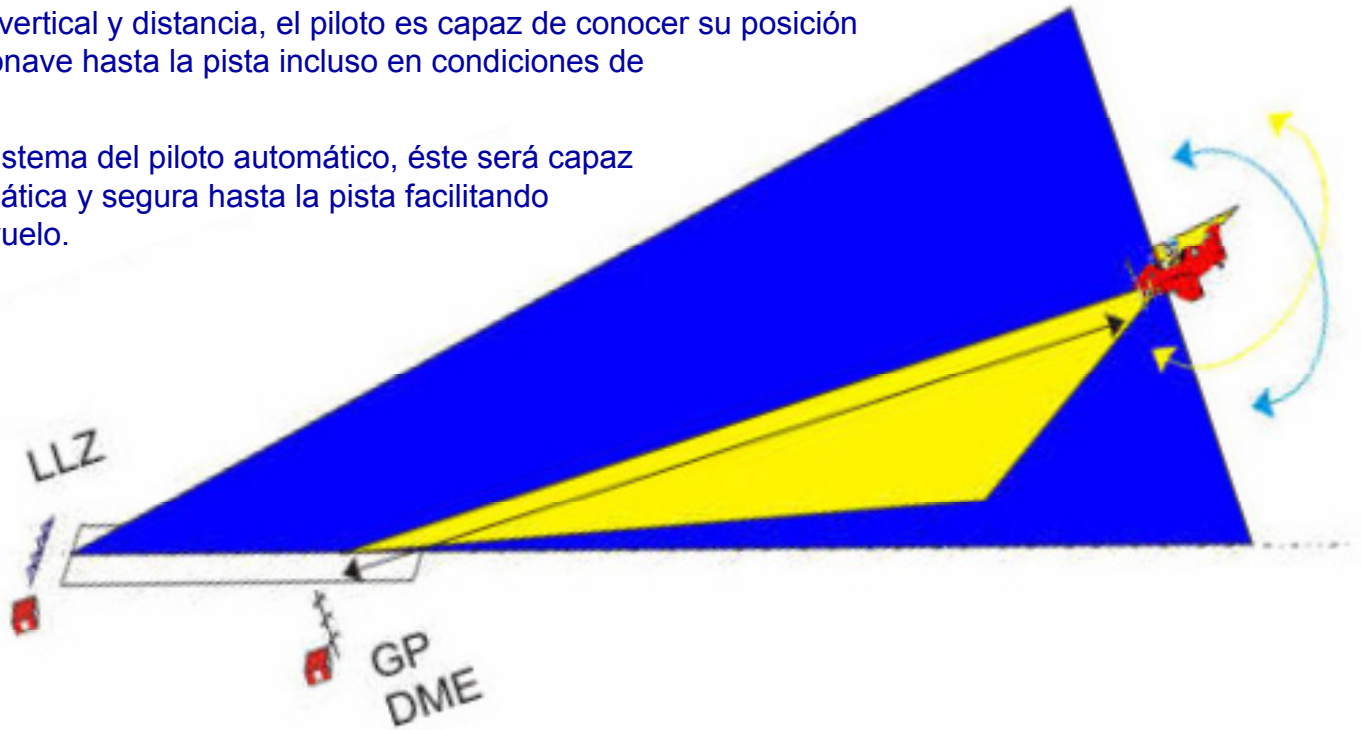
El sistema **DME de aterrizaje (DME-P o DME-Precision)** proporciona a la aeronave de forma continua información de distancia hasta el umbral de la pista. Las antenas del DME-P se instalan próximas al umbral junto con las de la senda de planeo y su frecuencia se relaciona con la del localizador de modo único (para ahorrarse tener que sintonizarlo independientemente). La referencia de distancia cero se establece en el umbral.

Antiguamente la información de distancia se proporcionaba mediante una línea de radiobalizas a 75 MHz instaladas en puntos específicos e indicados en las cartas de aproximación. Los transpondedores DME de aterrizaje proporcionan estas ventajas:

- La información de distancia es continua, lo que mejora y facilita los procedimientos de aproximación.
- No requiere instalaciones en el exterior del aeropuerto, abaratando la instalación.

Con las tres informaciones de planos horizontal, vertical y distancia, el piloto es capaz de conocer su posición en el espacio y guiar instrumentalmente a la aeronave hasta la pista incluso en condiciones de baja visibilidad.

Si estas tres informaciones se introducen en el sistema del piloto automático, éste será capaz de guiar al avión de forma completamente automática y segura hasta la pista facilitando el trabajo del piloto durante esta crítica fase del vuelo.



CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***ILS:***
  - Características de la Señal

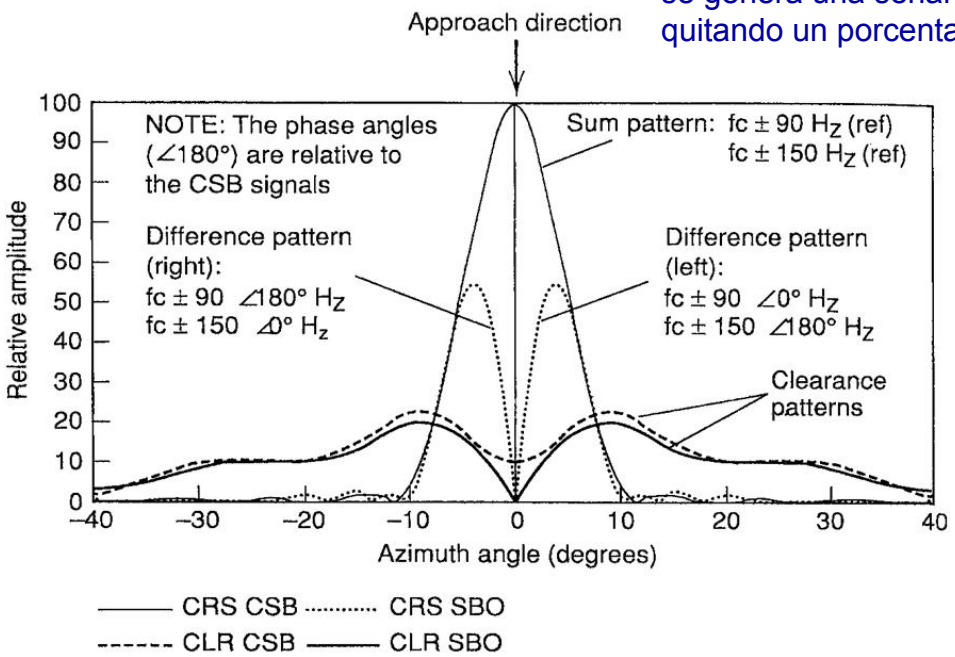
El Localizador (LOC), la Emisora de Senda de descenso (GP) y las radiobalizas (de existir) emiten Onda Continua (CW), con polarización horizontal y las bandas:

- Localizador : 40 Canales de 108-112 MHz (banda de FM)
- Senda de Descenso: 40 canales de 329-335 MHz (VHF)
- Radiobalizas: todas a 75 MHz.

El DME-P emite respuesta al interrogador de la aeronave y opera, como el DME de Navegación (DME-N) en 960-1125 MHz. Existe una relación fija entre cada frecuencia del LOC, la frecuencia del GP y la frecuencia del DME.

Así, si el LOC opera a 109.5 MHz, el GP operará a 333.6 MHz y el DME estará en su canal 32 y así será siempre. Con esta relación fija, basta con sintonizar el canal LOC de aterrizaje designado y todas las demás radioayudas serán sintonizadas automáticamente, reduciendo la carga de trabajo del piloto.

El LOC genera un haz de curso mediante la modulación en amplitud de la portadora con tonos a 90 Hz y a 150 Hz, por encima y por debajo de la frecuencia de la portadora (por ejemplo, 109.5 MHz+90 Hz, 109.5 MHz-150 Hz). La señal resultante es una portadora con bandas laterales (Carrier with Sidebands, CSB). La señal CSB radia un patrón de suma para proporcionar cobertura general en el área de aproximación. Ademas se genera una señal sólo de bandas laterales (Side Bands Only, SBO). La señal SBO se genera quitando un porcentaje a la energía de cada banda lateral y desplazándola en fase.



La señal SBO se emite en un patrón de diferencia, con su nulo alineado con la dirección de aproximación. Los lobulos del patrón de diferencias tienen fases opuestas (y por tanto también las bandas laterales de 90 y 150 Hz).

El resultado es que en la línea central donde la señal SBO es nula, sólo se puede detectar la señal CSB con bandas laterales de igual amplitud, de modo que el receptor puede proporcionar un curso hacia la pista.

A cada lado de la línea central, la señal SBO crece rápidamente en amplitud, de modo que la banda lateral de 90 Hz dominará a la izquierda de la dirección de aproximación y la banda lateral de 150 Hz dominará a la derecha.

La mayor limitación del ILS es su sensibilidad al entorno en forma de reflexiones no deseadas de los haces en estructuras circundantes (multipath) e interferencias con emisoras comerciales de FM (especialmente el LOC). El multipath sólo se puede resolver efectivamente limitando el tráfico en áreas muy afectadas del aeropuerto. Las interferencias con la radio FM comercial se puede paliar con receptores de a bordo más sensibles.

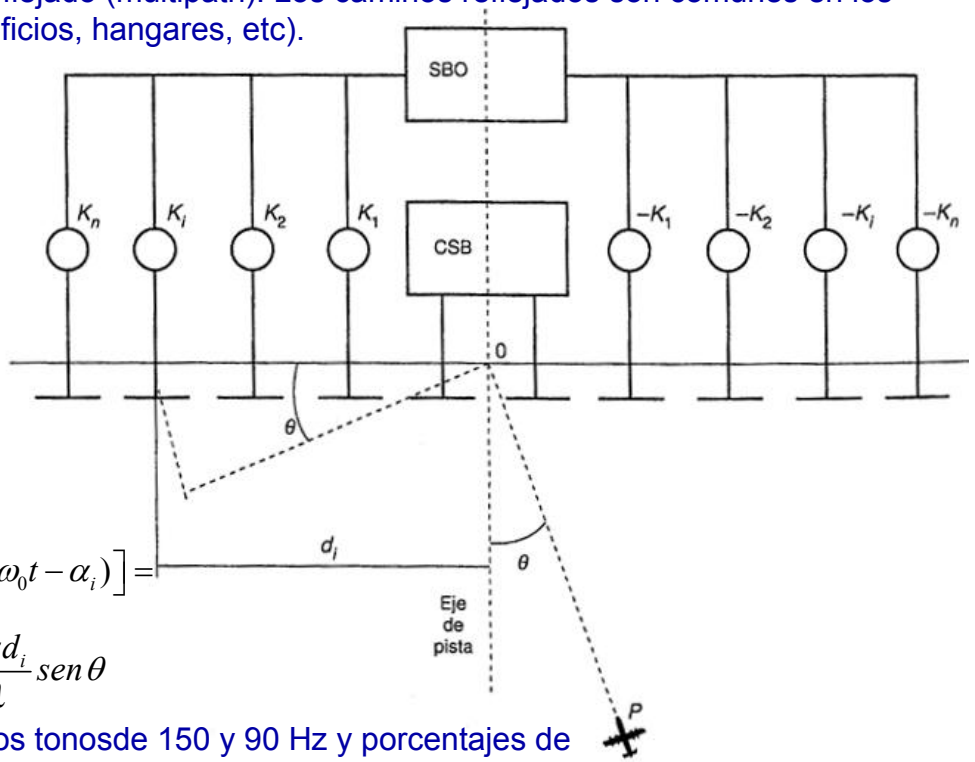
CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***ILS:***
  - Características de la Señal

El receptor ILS mide la magnitud de DDM y entrega una señal de desviación del curso. Así, cuando domina la señal de 90 Hz, el indicador del receptor mostrará "vuelo a la derecha" y cuando domina la señal de 150 Hz mostrará "vuelo a la izquierda". La señal de desviación es proporcional al ángulo de azimut ±5º. La anchura de haz CBS/SBO está entre 5º a 10º.
Además suele haber otro haz CBS/SBO,de menor potencia y de mayor ángulo (35º), con una portadora a 16 KHz respecto al haz principal. Este segundo haz se denomina haz de limpieza (Clearance Beam) y sirve para que el receptor, mediante técnicas de demodulación pueda distinguir si la señal recibida proviene de un camino de línea de mira o de un camino reflejado (multipath). Los caminos reflejados son comunes en los aeropuertos debido a la gran cantidad de dispersores de radio existentes (edificios, hangares, etc).

El localizador (LOC) se compone de una antena con dos dipolos llamada CSB y un conjunto de antenas de dipolo llamadas SBO. Sea I_{CSB} la corriente que alimenta a los 2 dipolos CSB e $I_{i,SBO}$ la que alimenta a los N dipolosSBO:



$$I_{CSB} = I_0\left[1 + msen(\omega_{150}t) + msen(\omega_{90}t)\right]sen(\omega_0 t)\ ,$$

$$I_{i,SBO} = I_0 K_i\left[sen(\omega_{150}t) - sen(\omega_{90}t)\right]\cos(\omega_0 t)\quad ,$$

$$\omega_{150} = 2\pi\cdot 150\ Hz\ ,\ \omega_{90} = 2\pi\cdot 90\ Hz\ ,\ m = 0.2$$

Una aeronave recibirá las señales CSB y SBO:

$$V_{CSB} = \left[1 + msen(\omega_{150}t) + m\,sen(\omega_{90}t)\right]\left[sen(\omega_0 t + \alpha_0) + sen(\omega_0 t + \alpha_0)\right] =$$

$$= 2\left[1 + msen(\omega_{150}t) + m\,sen(\omega_{90}t)\right]\left[\cos(\alpha_0)sen(\omega_0 t)\right]$$

$$V_{SBO} = \sum_{i=1}^{n} K_i\left[\left[-sen(\omega_{150}t) + sen(\omega_{90}t)\right]\cos(\omega_0 t + \alpha_i) + \left[sen(\omega_{150}t) - sen(\omega_{90}t)\right]\cos(\omega_0 t - \alpha_i)\right] =$$

$$= 2\sum_{i=1}^{n} K_i\left[sen(\omega_{150}t)sen\,\alpha_i - sen(\omega_{90}t)sen\,\alpha_i\right]sen(\omega_0 t)\ ;\quad \alpha_0 = \frac{2\pi d}{\lambda}sen\,\theta\ ,\ \alpha_i = \frac{2\pi d_i}{\lambda}sen\,\theta$$

Agrupando términos, la señal recibida será una onda modulada en AM con dos tonosde 150 y 90 Hz y porcentajes de modulación m_{150}, m_{90}:

$$m_{150} = \frac{m\cos\alpha_0 + \sum_{i=1}^{n} K_i sen\,\alpha_i}{\cos\alpha_0},\quad m_{90} = \frac{m\cos\alpha_0 - \sum_{i=1}^{n} K_i sen\,\alpha_i}{\cos\alpha_0}$$

$$V_{recibida} \propto \left[1 + m_{150}\,sen(\omega_{150}t) + m_{90}\,sen(\omega_{90}t)\right]sen(\omega_0 t)$$

CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***ILS:***
  - Características de la Señal

La suma de profundidad de modulación (SDM) para cualquier ángulo θ de aproximación es constante. Sin embargo la diferencia de profundidad de modulación,DDM, depende del ángulo de aproximación θ:

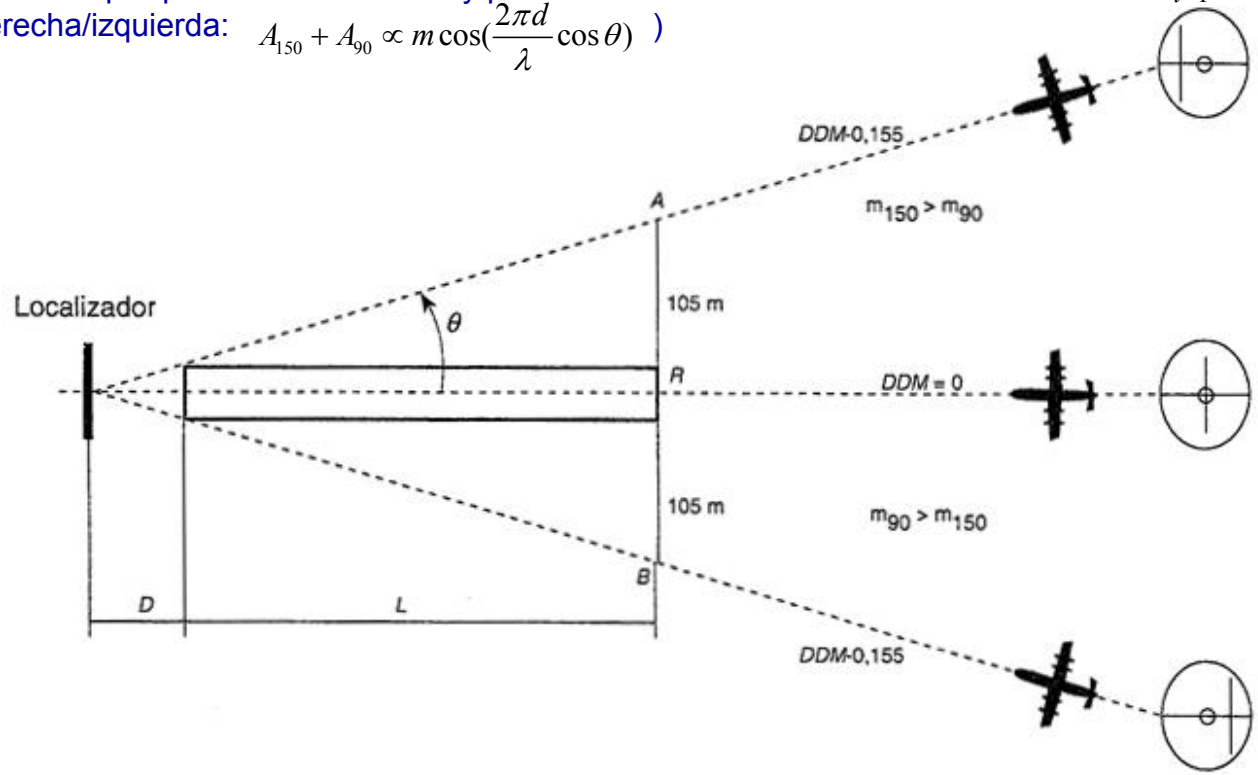
$$SDM = m_{150} + m_{90} = 2m \quad , \quad \boldsymbol{DDM} = m_{150} - m_{90} = \frac{2}{\cos(\frac{2\pi d}{\lambda} sen\,\boldsymbol{\theta})} 2\sum_{i=1}^{n} K_i sen(\frac{2\pi d_i}{\lambda} sen\,\boldsymbol{\theta})$$

A partir de la matemática se tiene que:

- En el Eje de Pista, θ=0, a_i=0 y m_{150}=m_{90}
- A la Derecha del eje de pista, θ>0, a_i>0 y m_{150}>m_{90}
- A la Izquierda del eje de pista, θ<0, a_i<0 y m_{150}<m_{90}

En el receptor ILS se detectan las amplitudes de las señales de 150 Hz y de 90 Hz y se restan: $A_{150} - A_{90} \propto \sum_{i=1}^{N} K_i sen(\frac{2\pi d_i}{\lambda} sen\,\theta)$

(la señal suma de amplitudes no sirve porque va con el coseno y por tanto no es sensible al signo de θ, i.e., no distingue derecha/izquierda: $A_{150} + A_{90} \propto m\cos(\frac{2\pi d}{\lambda}\cos\theta)$)

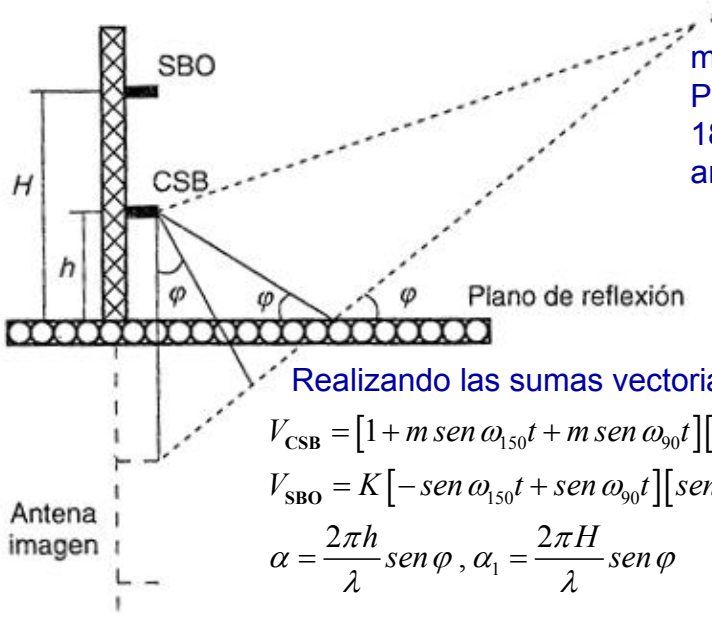


CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***ILS:***
  - Características de la Señal

La **señal de la emisora GP** es muy similar a la señal del LOC. La banda lateral a 90 Hz domina sobre la Senda de Descenso mientras que la banda lateral a 150 Hz domina bajo la Senda de Descenso.



La emisora GP, en su configuración más simple, se compone de dos antenas dipolares montadas en un mástil, sobre una superficie muy plana para que refleje bien la radiofrecuencia. Por efecto imagen, se tienen otras dos antenas bajo el plano de reflexión, con un desfase de 180º respecto a las antenas reales. La antena real superior es la SBO (Side Band Only) y la antena real inferior es la CSB (Carrier with Side Bands). Las antenas reales se alimentan con:

$$I_{SBO} = I_0[-sen\,\omega_{150}t + sen\,\omega_{90}t]\,sen\,\omega_0 t$$

$$I_{CSB} = I_0[1 + m\,sen\,\omega_{150}t + m\,sen\,\omega_{90}t]\,sen\,\omega_0 t \quad , \text{m=0.4}$$

con una profundidad de modulación de 40%.

Realizando las sumas vectoriales y considerando el desfase geométrico, se tiene que el receptor de GP recibe dos señales:

$$V_{CSB} = [1 + m\,sen\,\omega_{150}t + m\,sen\,\omega_{90}t][sen(\omega_0 t + \alpha) - sen(\omega_0 t - \alpha)]$$

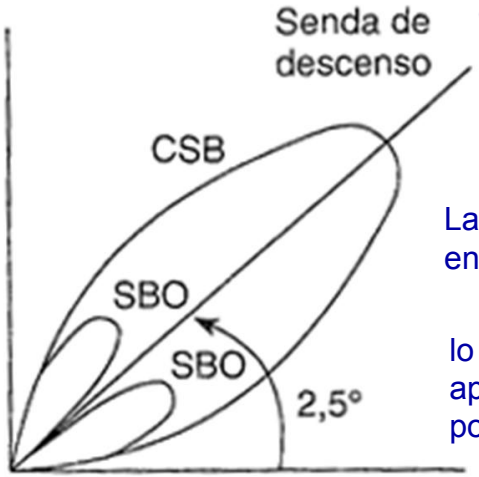
$$V_{SBO} = K[-sen\,\omega_{150}t + sen\,\omega_{90}t][sen(\omega_0 t + \alpha_1) - sen(\omega_0 t - \alpha_1)]$$

$$\alpha = \frac{2\pi h}{\lambda} sen\,\varphi\,,\ \alpha_1 = \frac{2\pi H}{\lambda} sen\,\varphi$$

luego el receptor recibirá una señal proporcional a:

$$V_{receptor} \propto [1 + m_{150} sen\,\omega_{150}t + m_{90} sen\,\omega_{90}t]\cos\omega_0 t$$

$$m_{150} = \frac{m\,sen\,\alpha - sen\,\alpha_1}{sen\,\alpha}\,,\ m_{90} = \frac{m\,sen\,\alpha + sen\,\alpha_1}{sen\,\alpha}$$



con una Suma de profundidad de modulación y una Diferencia de profundidad de modulación dadas por :

$$SDM = m_{150} + m_{90} = 2m \quad , DDM = m_{90} - m_{150} = \frac{2}{sen\alpha} sen\alpha_1$$

El receptor GP se quedará con la diferencia de amplitudes:

$$A_{90} - A_{150} = 4sen\left(\frac{2\pi H}{\lambda} sen\,\theta\right)$$

La Senda de Planeo sigue el eje del segundo nulo de la diferencia de amplitudes. El primer nulo se encuentra en φ=0º (sobre el eje de la pista) y el segundo está en :

$$\frac{2\pi H}{\lambda} sen\,\varphi_1 = \pi$$

lo que produce un ángulo comprendido entre 2º y 4º. La OACI recomienda ajustar H y λ para que el ángulo de aproximación esté en 2.5º. Existen otros nulos pero dan pendientes más inclinadas y son fácilmente descartados por el receptor.

CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***ILS:***
  - Geometría de Guiado

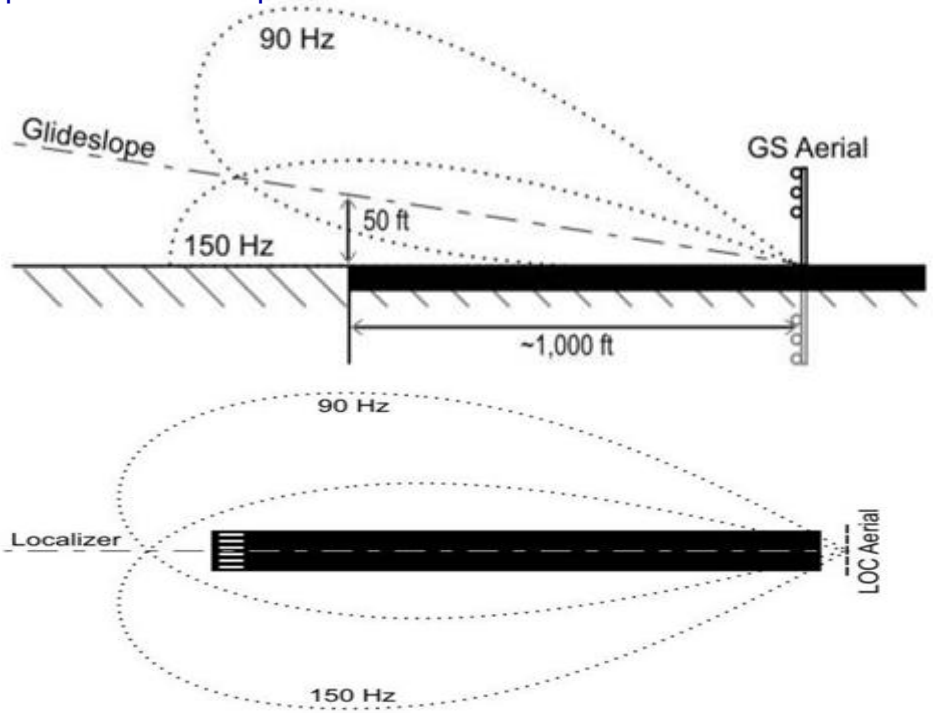
Las emisoras ILS (localizador y senda de planeo) conforman en el espacio una distribución espacial de la diferencia en la profundidad de modulación (DDM): $DDM = f(x, y, z)$ La trayectoria teórica de aproximación o Senda de Descenso, desde la perspectiva del receptor, será el lugar geométrico de DDM cero (amplitudes idénticas para las modulantes de 90 y 150 Hz):

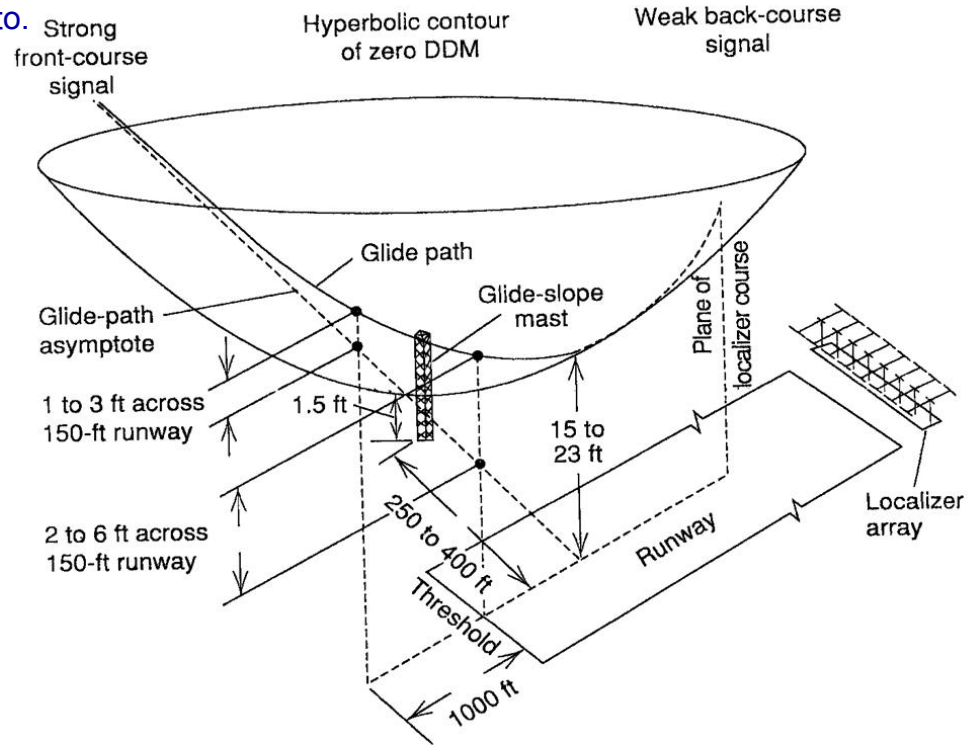
$$f_1(x, y, z) = 0 \ \ (\text{LOC})$$

$$f_2(x, y, z) = 0 \ (\text{GP})$$

que corresponde a un hiperboloide de revolución centrado en la vertical de la antena GP (es la figura geométrica definida a partir de la constancia de una diferencia). La dirección de máxima recepción de la señal del LOC coincidirá con el eje de la pista. Un plano vertical a la pista y paralelo a su eje cortará al hiperboloide de DDM nula en una hipérbola. Por tanto la curva seguida por la aeronave en su senda final de aproximación será una hipérbola.En el receptor ILS de a bordo se reciben dos señales, S1(DDM) y S2(DDM) que serán función de la posición de la aeronave respecto a la trayectoria teórica de aproximación.

El alcance típico en distancia de un ILS ronda los 8 km, por lo que la fase de aproximación terminal comienza aproximadamente en esa zona. En el sistema antiguo de marcación de distancias por radiobalizas, el límite exterior del ILS estaba marcado en 3.9 mn (7.2 km). En el modelo moderno de ILS con DME-P, el límite exterior es convencional y se establece sobre las 4 mn, siendo marcado este límite por la sensibilidad del receptor de a bordo o por las indicaciones de certificación de cada aeropuerto.



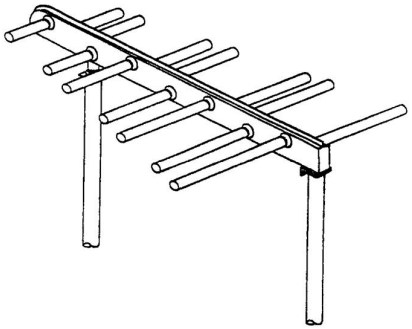


CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***ILS:***
  - Emisora ILS

Las antenas del localizador (LOC) están situadas a 1000 pies al final de la pista y se componen de 8 o 14 antenas Yagui-Udda, óptimas para FM-VHF. Operan como una red de fase, de modo que pueden transmitir tres patrones de radiación: uno con el lóbulo central alineado con el eje de la pista (patrón de suma) y los otros dos desalineados ±5 º a la derecha y a la izquierda del eje longitudinal de la pista (haz diferencia a 90 Hz y haz diferencia de 150 Hz).



Las antenas de la Senda de Aproximación (GP) se organizan como tres conjuntos de antenas reflectoras situados sobre un mástil. Las tres antenas reflectoras producen tres patrones, de modo similar a los patrones de la antena LOC. La tecnología de antena reflectora es más apropiada para la mayor frecuencia y sobre todo para poder aprovechar las reflexiones en el suelo para conformar verticalmente los haces. Aprovechando el efecto de reflexión en el suelo (efecto imagen) se tiene el equivalente a una antena virtual con 6 reflectores, 3 reales y 3 por imagen eléctrica en tierra.

Las tres antenas reflectoras se disponen a unos 300 m al lado de la pista, apuntando en su eje longitudinal hacia el umbral de pista, y situadas del umbral la distancia que, para esa configuración de suelo, hace que la hipérbola de Senda de Descenso tenga su punto más bajo de 15 a 23 pies (de 4.5 a 7 metros).

CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***ILS:***
  - Emisora ILS

En muchos aeropuertos se mantienen las **Radiobalizas de Distancia**. Estas radiobalizas transmiten un código Morse en 75 MHz e indican posición y altura aproximada a la que se encuentra el avión durante la aproximación.

- *Radiobaliza Exterior* (OM Outer Marker): localizada a 3.9 millas náuticas (7.2 km) del umbral de la pista. Emite dos rayas Morse por segundo a 400 Hz, mostrándose en cabina un indicador azul y el tono audio de Morse.
- *Radiobaliza Intermedia* (MM, Middle Marker): localizada justo en el punto de no retorno o punto de decisión en la senda de aproximación. Informa, en condiciones de baja visibilidad, que el contacto con la pista es inminente. Está modulada con un tono de 1300 Hz, punto y raya Morse, mostrándose en cabina como un indicador ámbar y el tono audio Morse.
- *Radiobaliza Interior* (IM, Inner Marker): si está instalada, indica, en condiciones de baja visibilidad, que se está sobre el umbral de la pista. En esta posición un avión normalmente llega a las condiciones mínimas de Categoría II (altura de decisión 100 pies, visibilidad de 1200 pies). Modulación Morse de 6 puntos por segundo,3000 Hz.

Radiobaliza OM

El equipo **DME-P** (DME Precision) sustituye a las Radiobalizas, hablándose de ILS enhanced. Técnicamente es muy similar al DME de Navegación (DME-N para distinguirlos).
Ofrece dos modos de operación: Aproximación Inicial (Initial Approach, IA) y Aproximación Final (Final Approach, FA). El modo IA es idéntico al de cualquier DME-N. En modo FA proporciona una precisión mayor. La diferencia entre ambos modos es la técnica por la que se establece el umbral de detección radar (i.e., la técnica CFAR empleada). El modo IA opera hasta 8 mn del umbral de pista y desde ahí hasta el aterrizaje actúa el FA.
El transponder se encuentra en tierra, dentro de un aeropuerto y por tanto rodeado de múltiples dispersores de señal radar. Esta geometría facilita que existan caminos de propagación de la señal diferentes al de la línea de mira entre interrogador y transponder (fenómeno de multicamino o multipath)). Una detección temprana del eco facilita que sólo se detecte el eco proveniente de la línea de mira porque es el primero en llegar. Para un DME-P se declara detección al 18% de la amplitud de pico de la señal, mientras que en el DME-N se declara al 50%. A cambio, se necesita una relación Señal/Ruido más favorable que para el caso DME-P; en este caso no es un gran problema debido a la cercanía relativa entre transponder e interrogador. La precisión de la medida de distancia del DME-P es de ±15 m con una confianza del 95% a 2 millas de distancia.

Transponder DME-P

CAPÍTULO V.

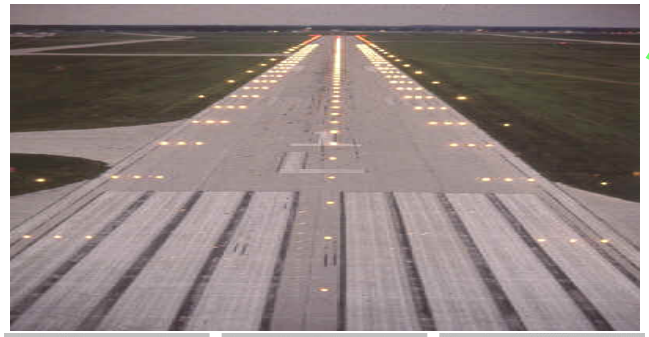
Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

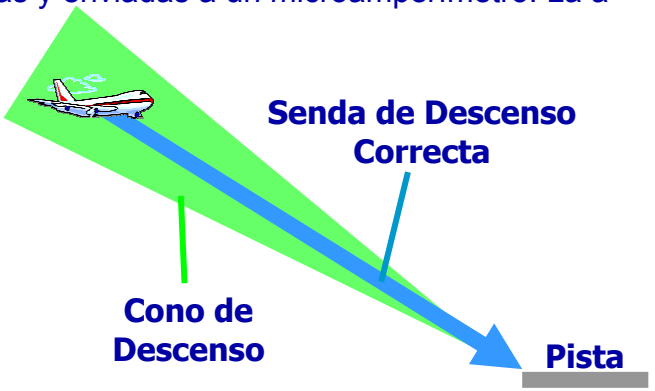
- ***ILS:***
  - Receptor ILS

En un sistema ILS de a bordo hay dos receptores de AM, uno para la señal del Localizador (Localizer o receptor LOC, orientación en azimut) y otro para la señal de la emisora de Senda de Descenso (Glide Path o receptor GP, orientación en elevación). Cualquiera de los dos receptores tienen control automático de ganancia (AGC) para compensar cambios en la intensidad de la señal recibida.

El **receptor LOC** puede ser el mismo que el receptor VOR (receptor VOR/LOC). Tiene mucho sentido hacerlo así puesto que ambos proporcionan orientación en azimut. Por este motivo las señales LLZ usan las mismas frecuencias y polarización que el VOR (con lo que también se reutiliza la antena VOR como antena LLZ). El indicador del tipo indicador de desviación de curso (Course Deviation Indicator, CDI), igual que el indicador VOR.Esta coincidencia es común en aviación general aunque en aviación comercial los receptores son distintos.
En el receptor hay dos filtros para separar las señales de 90 y 150 Hz. Esas señales son rectificadas y enviadas a un microamperímetro. La aguja del microamperímetro (o el indicador digital correspondiente) deflecta hacia la señal de mayor intensidad (de mayor profundidad de modulación).
Así, para una profundidad de modulación de 0.175, con mayor modulación en 90 Hz, el receptor estará demasiado a la izquierda del curso correcto, por lo que la aguja se inclinará a la derecha para indicar al piloto la corrección de curso apropiada.
Si la mayor modulación se produce en los 150 Hz, lo que indica receptor demasiado a la derecha del curso, tendremos una desviación a la izquierda de la aguja indicadora. Si se trata de un indicador digital EFIS, el icono emulará a la aguja de un indicador LOC electromecánico.

El **receptor GP** es esencialmente lo mismo. Se diferencia del receptor LOC en la orientación de las agujas, en este caso habrá una aguja que bajará si se detecta más intensidad en la señal GP de 90 Hz (indica mucha altura) y subirá si detecta más intensidad en la señal GP de 150 Hz(indica poca altura).

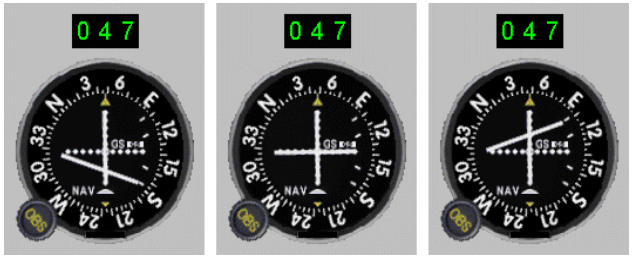




La aguja vertical indica dirección de pista

Aguja Centrada= Alineamiento Correcto

47 es la distancia DME en metros a cabecera de pista



La aguja horizontal indica por debajo, por encima de la Senda de Descenso
Agujas Centradas= Senda de Descenso Correcta

Flag NAV activado indica aprox. ILS

CAPÍTULO V.

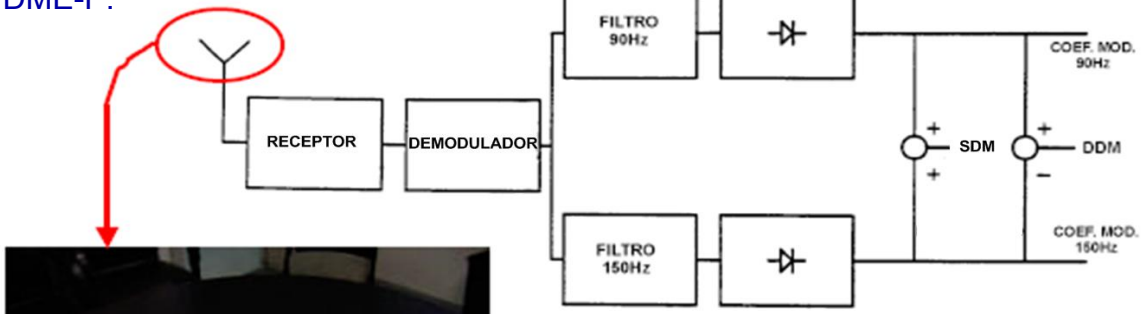
Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***ILS:***
  - Receptor ILS

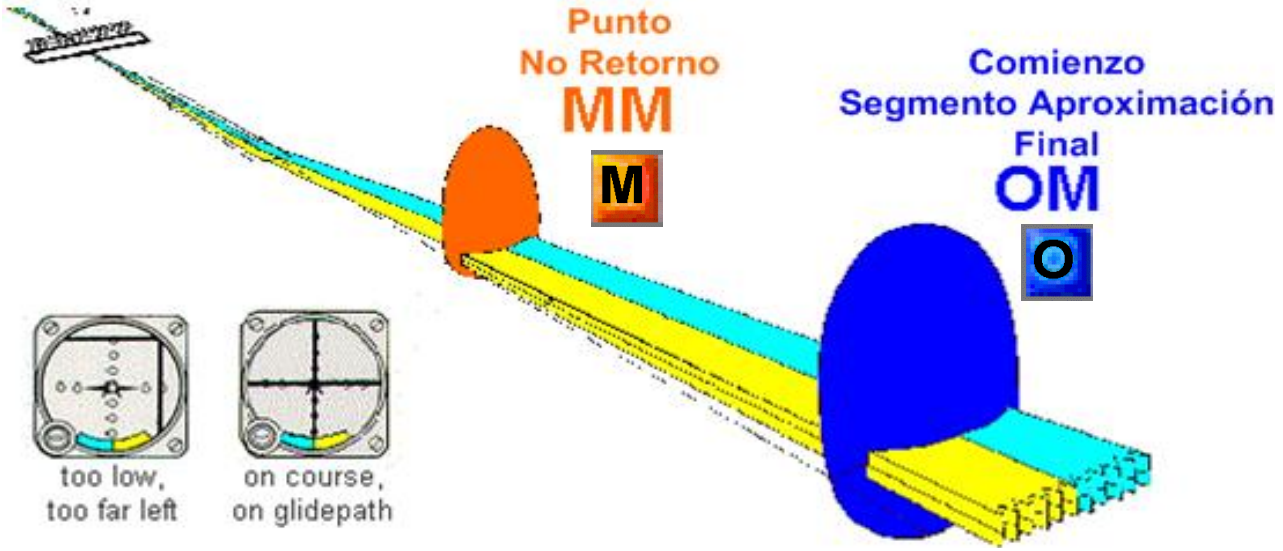
El localizador tiene un código Morse para identificarse. El Código de Identificación comienza siempre con la letra “I” para indicar que se trata de una estación ILS. El tono es el mismo que en el VOR, 1020 Hz. El código Ident se repite cada 10 s como mínimo. Por ejemplo, el aeropuerto de Barajas, Madrid, identifica su ILS como código IMAA en la pista 33L.Hoy en día sólo es normal encontrarse la Radio-baliza OM, habiendo sido las otras dos sustituidas por el sistema DME-P.

En Categoría III las señales del ILS son enviadas al piloto automático para realizar un aterrizaje automático. Cada aparato certificado para Cat III tiene una altura de decisión y mínimos de visibilidad establecidos en su certificación.

La indicación del DME-P se puede leer en el indicador del DME de Navegación (DME-N) y también en el indicador de ILS, expresado en metros.



Hay dos receptores, prácticamente idénticos, uno para la señal de LOC y otro para la señal de GP.



CAPÍTULO V.

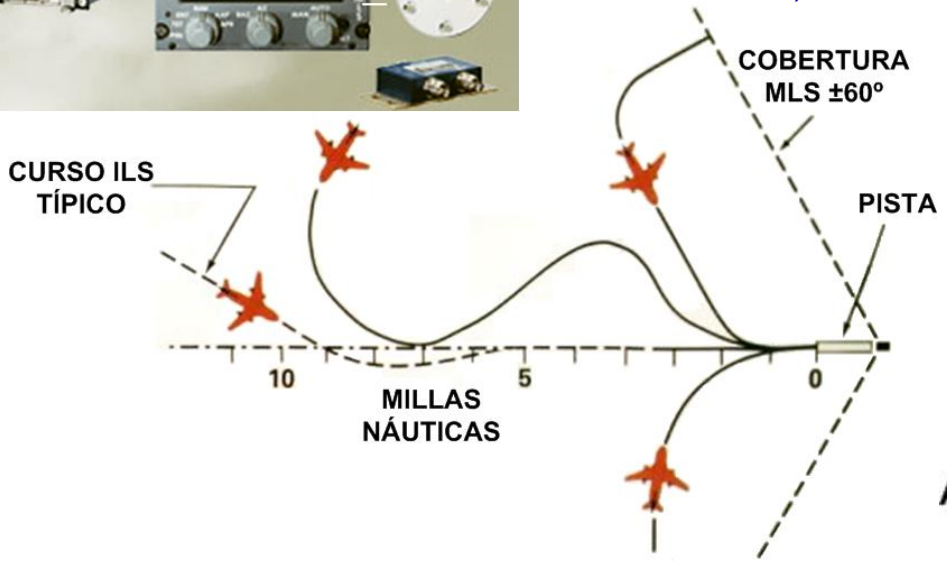
Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

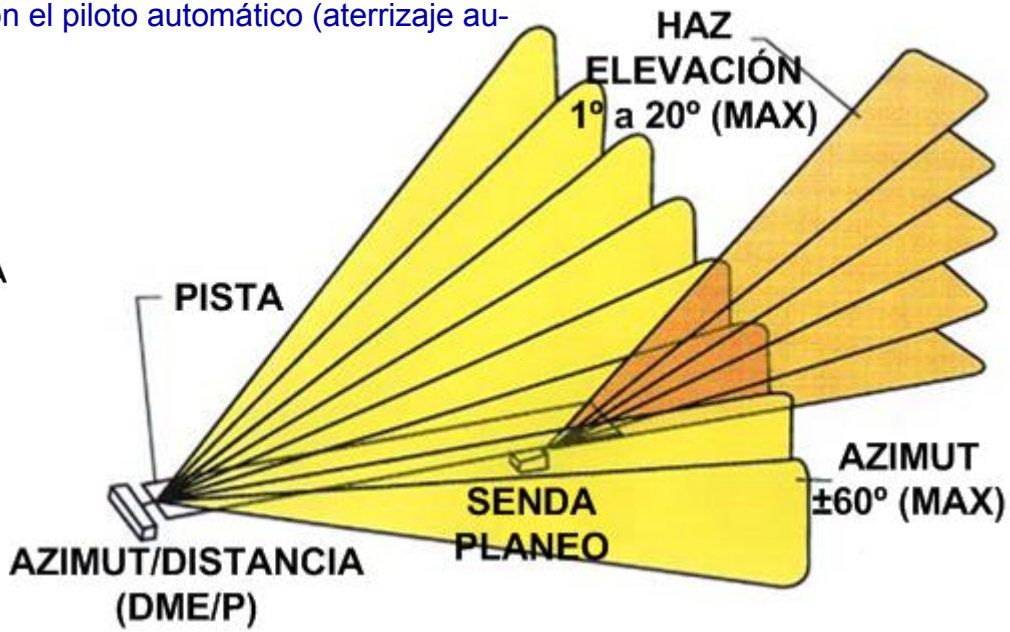
- ***MLS:***
  - Principio de Funcionamiento

El Microwave Landing System, MLS, es un sistema de aterrizaje de precisión todo tiempo que emplea haces de radar para la guía del avión en su fase de aterrizaje. Originalmente (años 80) fue propuesto como sustituto del ILS. Se puede entender como la combinación de un DME-P para medir distancias radiales y de un radar biestático 3D, con emisores en tierra y receptor en el avión para marcar posición angular. En total hay 5 radiofaros radar: de guía acimutal, de guía en elevación, de acimut posterior (opcional), de enderezamiento (aeropuertos con mucho tráfico) y DME/P (Precision Distance Measurement Equipment). Existe una estación central que sincroniza todos los radiofaros, transmite las señales de identificación y otros datos, las señales OCI (Out of Clearance Indication) y la señal de "clearance" (fly left/fly right) que permite situar al piloto en la zona de guiado proporcional.

Los transmisores radar emiten haces en abanico (fan beam) con una precisión de 1º en la sección estrecha del haz. Así, el transmisor de elevación emite un haz con un ancho de 40º en azimut y 1º en elevación y el haz de azimut emite su haz con 1º en elevación y 40 º en azimut. El haz de elevación cumple el papel del LOC del ILS mientras que el haz de azimut hace las veces del GP del ILS.

MLS proporciona guía de precisión no sólo en el área de aterrizaje (sobre 8 km hasta la cabecera de la pista) sino también en el área de aproximación terminal (sobre 40 km). Esta cualidad permite que las aeronaves se aproximen en rutas curvadas (en azimut y en elevación) hacia la cabecera de pista, aumentando la flexibilidad en la aproximación. MLS permite operaciones en todas las categorías, incluido el enclavamiento con el piloto automático (aterrizaje automático en Cat III).





CAPÍTULO V.

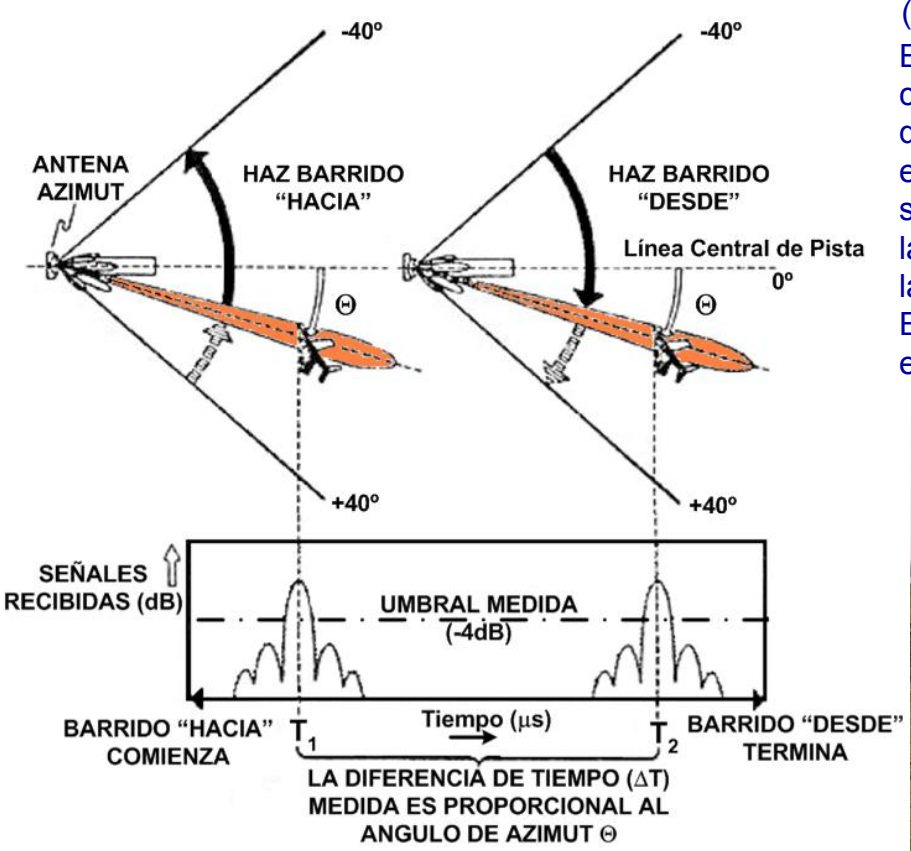
Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***MLS:***
  - Principio de Funcionamiento

Una aeronave iluminada por los haces de radar de MLS determina su posición angular en azimut y elevación por coincidencia en la recepción de dos haces. El principio se conoce como INTERSCAN (INTERval SCANnning) y también como Time Reference Scanning Beam (TRSB). Los haces están barriendo de un lado a otro (TO and FROM) continuamente, el haz de elevación arriba y abajo entre 0º y 15º; el haz de azimut ±40º respecto al centro de la pista. Sea que el haz de elevación, por ejemplo en el barrido TO intercepta al receptor de la aeronave, ésta marca el instante de recepción. Un tiempo después recibirá el haz de retorno (por ejemplo el FRO). El intervalo temporal entre la recepción de los haces está directamente relacionado con el ángulo de elevación según la fórmula:

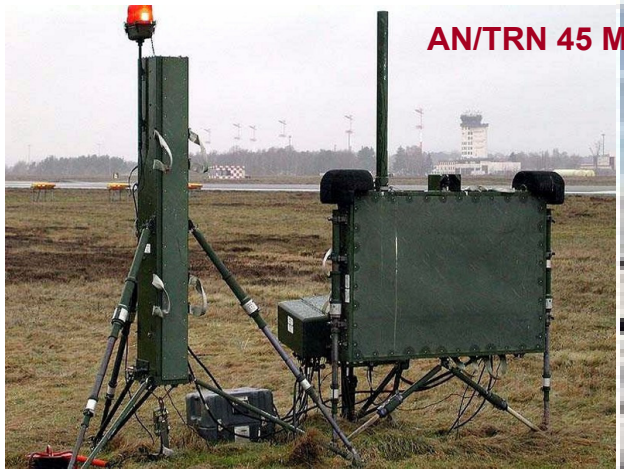
$$\Theta = \frac{V(T_0 - t)}{2}$$

donde Θ es el ángulo de elevación en grados, V es la velocidad de barrido (típicamente 20º/msec), T_0 es el valor de la diferencia de tiempos en la línea vertical central y t es el intervalo entre el haz "HACIA" y el haz "DESDE". Para el haz de azimut el funcionamiento es análogo. Las estaciones MLS transmiten funciones de ángulo (principio TRSB) y de datos (mensajes), en 200 canales, de 5031.0 MHz a 5190.7 MHz.



El sistema MLS no ha alcanzado el uso esperado: su mayor frecuencia de operación y su mayor direccionalidad y alcance lo hacen más sensible a ecos parásitos que el sistema que pretende sustituir (ILS). En aeropuertos donde el ILS producía ecos parásitos por cercanía de edificios y otras estructura no se puede pensar en sustituirlo por el MLS porque el problema se agrava. Además es necesario cambiar la infraestructura del ILS por otra de MLS, tanto en el segmento de vuelo como en la pista deaterrizaje.

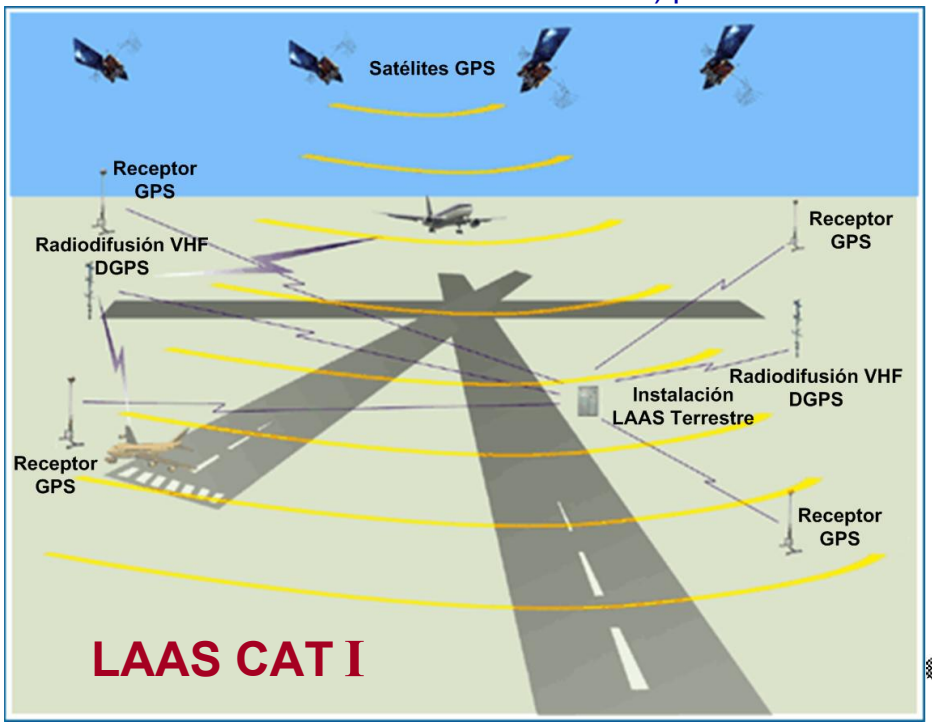
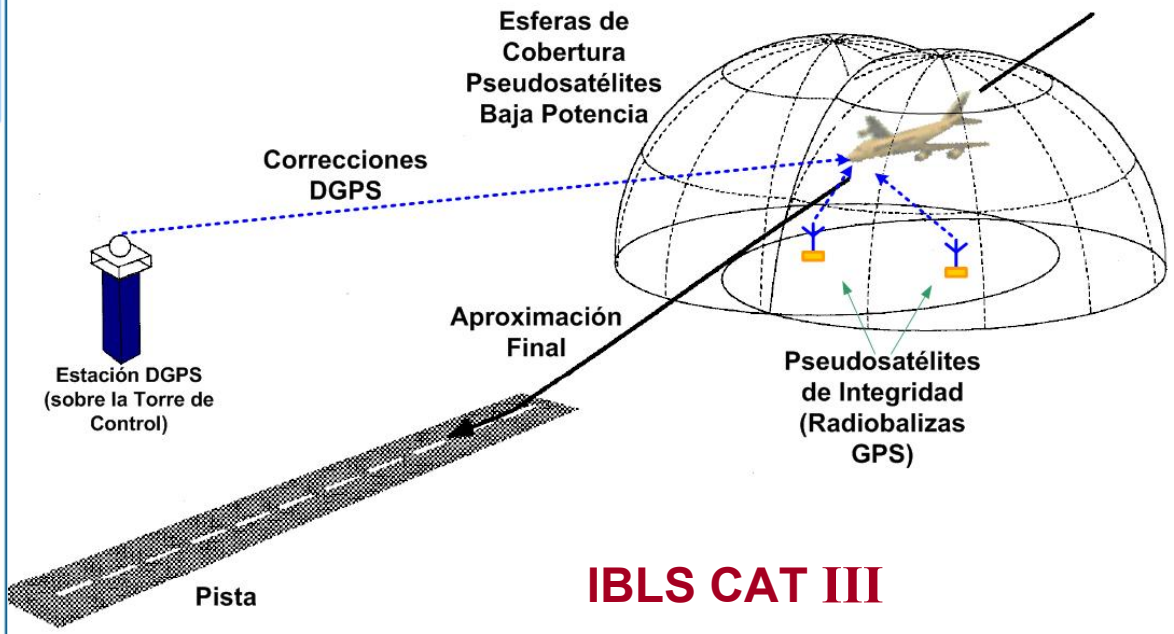
El sistema que está realmente sustituyendo al ILS es el DGPS (LAAS). Entretanto en muchos aeropuertos se ha suplementado el ILS clásico con el DME/P del MLS.



AN/TRN 45 Mobile MLS

CAPÍTULO V.

Tema 4 RadioNavegación Corto Alcance: ADF/NDB, VOR/DME, ILS/MLS

- ***LAAS/GBAS:***
  - Principio de Funcionamiento

El **Satelite Landing System**, SLS (o LAAS/GBAS, Local Area Augmentation System/ Ground Based Augmentation System) será el sustituto del ILS, a mucho menor costo. En la aeronave no hay que añadir instrumento alguno porque vale el navegador GPS ya existente; en el aeropuerto la infraestructura se reduce a tres o más receptores GPS, un ordenador de cálculo de correcciones y una radio VHF para difundirlas. Además presenta otras ventajas: un sólo sistema LAAS cubre todas las pistas, permite aproximaciones en rutas curvadas (como el MLS, con mayor cobertura aún) y proporciona servicios de navegación terrestre de precisión durante el taxi de las aeronaves. Al no estar basado en haces (como ILS/MLS) no tiene problemas con los multiecos provenientes de edificaciones cercanas. AENA ha montado un SLS de Honeywell en el aeropuerto de Málaga durante 2005 (el aeropuerto Ruiz Picasso está rodeado de construcciones y ha tenido problemas con rebotes de señal ILS).
Un SLS actual permite aproximaciones Cat I, estando previsto que para 2008 puedan servirse aproximaciones Cat II/III. El sistema **IBLS** (Improved Beacon Landing System) consigue Cat III (aterrizaje automático, error de posicionamiento ~10 cm en la senda final de aterrizaje) . Consiste en un DGPS aumentado con dos pequeñas radiobalizas en la senda de aproximación conocidas como pseudosatélites o pseudolites.
Un pseudolite es una emisora miniaturizada de corto alcance de señal GPS, perfectamente localizada en el suelo. La presencia de la señal del pseudolite está garantizada por los servicios aeroportuarios. Esa señal es recibida por el receptor DGPS (que ya ha eliminado los errores de ionosfera de la señal de GPS de los satélites) para eliminar el error de GDOP.